



Universidad
Carlos III de Madrid
www.uc3m.es

DEPARTAMENTO DE TEORÍA DE LA SEÑAL Y
COMUNICACIONES

Trabajo Fin de Grado

Implementación de un analizador vectorial para señales GSM mediante equipo Software Defined Radio

Grado en Ingeniería en Tecnologías de
Telecomunicación

Autora: Jimena Arranz Herrera

Tutor: Dr. Víctor P. Gil Jiménez

Leganés, Octubre de 2014

Resumen

Un analizador vectorial de señales es un instrumento capaz de medir diferentes parámetros de una señal, como su magnitud y fase. Además, es útil para demodular señales que han sido moduladas digitalmente, como las GSM o las UMTS. Aparte de ser imprescindible para la docencia de asignaturas relacionadas con las comunicaciones móviles, también tiene su papel importante en la investigación.

Este equipo es caro y es habitual que las universidades cuenten con pocos ejemplares, por no decir con uno o ninguno. En el caso de la Universidad Carlos III contamos con uno solamente. Para que los alumnos puedan usarlo en sus prácticas, tiene que haber coordinación tanto entre los profesores de las asignaturas que lo necesiten como entre los alumnos dentro de una misma clase.

El objetivo de este trabajo fin de grado es implementar las mismas funcionalidades del analizador vectorial de señales con que se cuenta en el Laboratorio de Comunicaciones Móviles de la Universidad Carlos III de Madrid, limitándolo a las señales GSM y haciendo uso de otro equipo más económico y de un software específico compatible con este.

Abstract

A vector signal analyzer is an instrument able to measure different parameters of a signal, such as its magnitude and phase. Besides, it is useful to demodulate signals that have been digitally modulated, as are GSM or UMTS. Apart from being essential for teaching subjects related to mobile communications, it does also have an important role in investigation.

This equipment is expensive and it is usual for universities to have few units. In the case of the Carlos III University of Madrid, there is only one. For the students to be able to use it at their laboratory exercises there might be an accurate coordination among all teachers that need it and the students inside a same group.

The goal of this Bachelor Thesis is to implement some of the functionalities of the vector signal analyzer that there is at the Mobile Communications Laboratory at the Carlos III University of Madrid, focusing on GSM signals and making use of other equipment more economic together with a software that is compatible with this equipment.

Índice de Contenidos

RESUMEN.....	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE DE CONTENIDOS	1
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
GLOSARIO.....	9
EXTENDED SUMMARY	14
Introduction.....	14
Description of the Problem	14
Suggested Solution and Goals	15
Work Planning	15
State of the Art	16
VSA in the market.....	17
GSM: Introduction and Features	17
GSM Evolution	18
Software Defined Radio	19
Developed Tool.....	21
Implemented Analyzer	21
Equipment	21
Regulation	22
Testing and Validation	23
Demodulation	23
Decoding	24
Constellation	25

Power Spectral Density	25
Trigger	26
Socioeconomic environment and budget	26
Conclusions and Improvements	27
 IMPLEMENTACIÓN DE UN ANALIZADOR VECTORIAL PARA SEÑALES GSM MEDIANTE EQUIPO SOFTWARE DEFINED RADIO.....	 29
 1 INTRODUCCIÓN	 30
1.1 Descripción del problema	30
1.2 Solución propuesta y objetivos	31
1.3 Planificación del trabajo	31
Diagrama de Gantt	32
1.4 Estructura de la memoria	33
 2 ESTADO DEL ARTE.....	 35
2.1 Analizadores de espectro y su evolución	35
2.2 AVS del mercado	36
Keysight Technologies	36
Rohde & Schwarz	37
2.3 National Instruments.....	38
 3 GSM	 39
3.1 Breve introducción	39
3.2 Descripción general	39
Arquitectura	41
3.3 Capa física.....	42
Modulación	42
Codificación diferencial	43

Decodificación	43
Tramas y canales	44
3.4 Evolución de GSM	46
2.5G: GPRS.....	46
2.75G: EDGE	47
3G: UMTS	48
3.5G: HSDPA	50
4G: LTE.....	51
4 SOFTWARE DEFINED RADIO	53
4.1 Definición	53
4.2 Ventajas y desventajas	53
4.3 Aplicaciones.....	54
4.4 Tecnologías relacionadas	54
4.5 USRP	55
5 HERRAMIENTA DESARROLLADA.....	57
5.1 Descripción del analizador implementado	57
5.2 Equipo empleado.....	57
LabVIEW	57
NI USRP-2920	58
Ordenadores	61
Generador vectorial de señales Agilent E4438C	62
Analizador vectorial de señales 89600S	63
5.3 Marco regulador	65
Marca CE	65
Seguridad de equipos de laboratorio	65
Compatibilidad electromagnética	65
5.4 Pruebas y validación	66
Demodulación	66
Decodificación	71

Constelación	73
Densidad espectral de potencia	75
Potencia comprendida entre dos marcadores	77
Disparador	81
 6 ENTORNO SOCIOECONÓMICO Y PRESUPUESTO	82
6.1 Coste de material.....	82
6.2 Coste de software	83
6.3 Coste de personal	84
6.4 Coste global	84
 7 CONCLUSIONES Y MEJORAS	85
7.1 Conclusiones del trabajo	85
7.2 Mejoras futuras	87
 REFERENCIAS.....	88
 ANEXOS	93
 A. DIAGRAMAS DE BLOQUES DEL DEMODULADOR.....	94
 B. MANUAL DE UTILIZACIÓN DEL ANALIZADOR IMPLEMENTADO	97
 C. CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA DEL ANALIZADOR AGILENT	100

Índice de Figuras

FIGURA 1-1: DIAGRAMA DE GANTT.....	33
FIGURA 2-1: ANALIZADOR DE ESPECTRO	35
FIGURA 2-2: VISTA LATERAL DEL AVS DE KEYSIGHT TECHNOLOGIES.....	36
FIGURA 2-3: VISTA FRONTAL DEL ANALIZADOR DE ESPECTROS DE ROHDE & SCHWARZ.....	37
FIGURA 2-4: LOGOTIPO DE NATIONAL INSTRUMENTS.....	38
FIGURA 3-1: A LA IZQUIERDA, LOGOTIPO DE GSM HASTA EL AÑO 2000 Y A LA DERECHA, A PARTIR DE ENTONCES [10]	39
FIGURA 3-2: CLUSTER EN EL QUE CADA LETRA INDICA UNA FRECUENCIA DIFERENTE [11]	40
FIGURA 3-3: CONJUNTO DE CLUSTERS EN LOS QUE SE PUEDE APRECIAR EL CONCEPTO DE REUTILIZACIÓN DE FRECUENCIA: LAS CELDAS QUE TIENEN LA MISMA LETRA TIENEN ASIGNADA LA MISMA FRECUENCIA [11].....	40
FIGURA 3-4: ESQUEMA GENERAL DE LA ARQUITECTURA GSM [12]	41
FIGURA 3-5: ESTRUCTURA DE LAS TRAMAS EN GSM	45
FIGURA 3-6: ESQUEMA DE LA ARQUITECTURA GPRS.....	47
FIGURA 3-7: LOGOTIPO DEL PROYECTO 3GPP [18]	49
FIGURA 3-8: ESQUEMA DE LA ARQUITECTURA UMTS [19]	50
FIGURA 3-9: LOGOTIPO DE LTE [18]	51
FIGURA 3-10: ESQUEMA DE LA ARQUITECTURA DE LTE [20]	52
FIGURA 4-1: DIAGRAMA QUE MUESTRA LA RELACIÓN ENTRE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS	55
FIGURA 5-1: LOGOTIPO DE LABVIEW [5]	58
FIGURA 5-2: PANEL FRONTAL DEL NI USRP-2920 [31]	59
FIGURA 5-3: NI USRP-2920 [29].....	59
FIGURA 5-4: ANTENA RECEPTORA VERT2450 [32]	59
FIGURA 5-5: ENTRADA "DEVICE NAMES" DONDE HAY QUE ESPECIFICAR LA IP DEL USRP	60
FIGURA 5-6: CÓMO ACCEDER A LA IP DE UN USRP. PARTE 1.....	60
FIGURA 5-7: CÓMO ACCEDER A LA IP DE UN USRP. PARTE 2.....	61
FIGURA 5-8: GENERADOR VECTORIAL DE SEÑALES AGILENT E4438C [33]	62
FIGURA 5-9: ESQUEMA DEL ENTORNO DE TRABAJO.....	63
FIGURA 5-10: ANALIZADOR VECTORIAL DE SEÑALES 89600S [35]	64
FIGURA 5-11: ESQUEMA DE EJEMPLO DE UTILIZACIÓN DEL ANALIZADOR VECTORIAL DE SEÑALES.....	64
FIGURA 5-12: MARCA CE [36].....	65
FIGURA 5-13: ESQUEMA DEL DECODIFICADOR.....	71
FIGURA 5-14: ENTRADA "INVERSION BITS" AÑADIDA	72
FIGURA 5-15: IMPLEMENTACIÓN DEL DECODIFICADOR	72
FIGURA 5-16: EJEMPLO DE CÓMO SE VEN LOS BITS A LA SALIDA DEL DECODIFICADOR	73

FIGURA 5-17: DIAGRAMA DE CONSTELACIÓN GSMK.....	73
FIGURA 5-18: INSTRUMENTO VIRTUAL PARA LA REPRESENTACIÓN DE LA CONSTELACIÓN	74
FIGURA 5-19: CONSTELACIÓN OBTENIDA PARA EL PATRÓN 4 1'S Y 4 0'S.....	74
FIGURA 5-20: INSTRUMENTO VIRTUAL QUE HALLA LA DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA.....	75
FIGURA 5-21: IMPLEMENTACIÓN PARA CALCULAR LA DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA	75
FIGURA 5-22: DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA PARA EL PATRÓN 8 1'S Y 8 0'S	76
FIGURA 5-23: CONTROLES PARA CAMBIAR LAS UNIDADES DE LA GRÁFICA PSD	76
FIGURA 5-24: DIAGRAMA DE BLOQUES PARA PASAR A DBM	77
FIGURA 5-25: MARCADORES EN LA MISMA POSICIÓN, SEGÚN SE PULSA EL BOTÓN	77
FIGURA 5-26: POSICIÓN DE LOS MARCADORES UNA VEZ SE HAN COLOCADO DONDE SE DESEA.....	78
FIGURA 5-27: INSTRUMENTO VIRTUAL QUE PERMITE SIMULAR SEÑALES	78
FIGURA 5-28: DIAGRAMA DE BLOQUES PARA LAS PRUEBAS DE FFT	79
FIGURA 5-29: FFT DE LA SEÑAL SINUSOIDAL CON EL EJE X COLOCADO.....	79
FIGURA 5-30: FFT DE LA SEÑAL GSM RECIBIDA.....	80
FIGURA 5-31: PSD CON LA POTENCIA COMPRENDIDA ENTRE DOS MARCADORES	81
FIGURA 5-32: DISPARADOR	81
FIGURA 7-1: CONSTELACIÓN OBTENIDA EN LA FRECUENCIA CENTRAL 945,9 MHZ	85
FIGURA 7-2: SEÑAL EN TIEMPO REAL OBTENIDA EN LA FRECUENCIA CENTRAL 945,9 MHZ	86
FIGURA A-1: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL DEMODULADOR DESARROLLADO.....	94
FIGURA A-2: INSTRUMENTO VIRTUAL DEL DEMODULADOR DESARROLLADO	94
FIGURA A-3: DIAGRAMA DE BLOQUES DE <code>MT MAP SYMBOLS TO BITS</code> CON LAS MODIFICACIONES PERTINENTES.....	95
FIGURA A-4: DIAGRAMA DE BLOQUES DE <code>MOD_MSK DEMOD SYMBOL DEMAP</code> CON LOS CAMBIOS PERTINENTES.....	96
FIGURA B-1: ARCHIVOS NECESARIOS PARA LA UTILIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA DESARROLLADA	97
FIGURA B-2: APARIENCIA DE LA APLICACIÓN AL ABRIRLA	97
FIGURA B-3: ENTRADA PARA ESPECIFICAR LA IP DEL USRP.....	98
FIGURA B-4: FRECUENCIA PORTADORA Y TASA DE MUESTREO.....	98
FIGURA B-5: BOTÓN PARA EJECUTAR LA APLICACIÓN	98
FIGURA B-6: BOTÓN PARA DETENER LA APLICACIÓN	98
FIGURA B-7: PANEL FRONTAL DE <code>RECEPTOR.VI</code>	99
FIGURA C-1: ICONO DEL SOFTWARE DEL ANALIZADOR VECTORIAL DE SEÑALES	100
FIGURA C-2: CONFIGURACIÓN DEL DEMODULADOR DIGITAL	100
FIGURA C-3: CONFIGURACIÓN DEL DEMODULADOR GSM. PASO 2.....	101
FIGURA C-4: CONFIGURACIÓN DEL DEMODULADOR GSM. PASO 1.....	101
FIGURA C-5: CONFIGURACIÓN DE LA FRECUENCIA CENTRAL	102
FIGURA C-6: RESULTADO TRAS CONFIGURAR LA FRECUENCIA CENTRAL	102

FIGURA C-7: CUADRÍCULA 2X2	103
FIGURA C-8: CÓMO CAMBIAR EL NÚMERO DE GRÁFICAS	103
FIGURA C-9: CÓMO CAMBIAR UNA GRÁFICA.....	104
FIGURA C-10: ELECCIÓN DE GRÁFICA “RAW MAIN TIME”	104
FIGURA C-11: SEÑAL EN TIEMPO REAL.....	105
FIGURA C-12: AUTOESCALAR GRÁFICA	105
FIGURA C-13: RESULTADO DE LOS CAMBIOS REALIZADOS	106
FIGURA C-14: CONFIGURACIÓN DEL GENERADOR DE SEÑALES.....	106
FIGURA C-15: SEÑAL EN TIEMPO REAL RECIBIDA PARA LA CONFIGURACIÓN DE LA FIGURA C-14.....	107
FIGURA C-16: CÓMO AÑADIR UN MARCADOR A UNA GRÁFICA.....	107
FIGURA C-17: MARCADOR SOBRE UNA GRÁFICA.....	108
FIGURA C-18: CARACTERÍSTICAS DEL MARCADOR AÑADIDO	108
FIGURA C-19: CÓMO AÑADIR UNA BANDA DE POTENCIA	108
FIGURA C-20: POTENCIA COMPRENDIDA ENTRE DOS FRECUENCIAS	109

Índice de Tablas

TABLA 1-1: TABLA DE TAREAS QUE COMPONEN EL TRABAJO	33
TABLA 3-1: FRECUENCIAS DE OPERACIÓN DE LAS BANDAS GSM	40
TABLA 3-2: ESQUEMA DE UNA RÁFAGA NORMAL	45
TABLA 3-3: RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE ESTÁNDARES 2G	48
TABLA 3-4: ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS PARA UMTS.....	48
TABLA 3-5: ORGANISMOS QUE COMPONEN EL PROYECTO 3GPP	49
TABLA 3-6: RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE ESTÁNDARES 3G Y 4G	52
TABLA 5-1: CARACTERÍSTICAS DE LAS SEÑALES GSM GENERADAS CON EL GENERADOR AGILENT	62
TABLA 5-2: TASAS DE MUESTREO CORRESPONDIENTES A LOS NÚMEROS DE MUESTRAS POR SÍMBOLO 67	
TABLA 5-3: RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CAMBIANDO EL Nº DE MUESTRAS POR SÍMBOLO A LA ENTRADA DEL DEMODULADOR	68
TABLA 5-4: RESULTADOS VARIANDO EL PATRÓN PARA CADA TASA DE MUESTREO	70
TABLA 6-1: COSTE DE MATERIAL	83
TABLA 6-2: COSTE DE SOFTWARE.....	83
TABLA 6-3: COSTE DE PERSONAL.....	84
TABLA 6-4: COSTE GLOBAL DEL TRABAJO FIN DE GRADO	84

Glosario

1G	Primera generación de telefonía móvil
2G	Segunda generación de telefonía móvil
3G	Tercera generación de telefonía móvil
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i> (Proyecto asociación de tercera generación)
4G	Cuarta generación de telefonía móvil
8-PSK	<i>8-Phase Shift Keying</i> (Modulación por desplazamiento de fase con ocho fases)
AELC	<i>Asociación Europea de Libre Comercio</i>
AM	<i>Amplitude Modulation</i> (Modulación de amplitud)
ARIB	<i>Association of Radio Industries and Business</i> (Asociación de Industrias y Negocios de Radio)
ATIS	<i>Alliance for Telecommunications Industry Solutions</i>
AuC	<i>Authentication Center</i> (Centro de Autenticación)
AVS	<i>Analizador Vectorial de Señales</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i> (Modulación por desplazamiento de fase binaria)
BSC	<i>Base Station Controller</i> (Controlador de estaciones base)
BSS	<i>Base Station Subsystem</i> (Subsistema de estaciones base)
BT	<i>Bandwidth Time product</i> (Producto Ancho de banda-Tiempo)
BTS	<i>Base Transceiver Station</i> (Estación base Transceptora)
CCSA	<i>China Communications Standards Association</i>

CE	<i>Conformidad Europea</i>
CR	<i>Cognitive Radio</i> (Radio Cognitiva)
DCS 1800	<i>Digital Cellular System 1800 MHz</i> (Sistema Celular Digital 1800 MHz)
DSP	Digital Signal Processing (Procesamiento digital de señales)
E-GSM	<i>Extended GSM Band</i> (Banda GSM Extendida)
E-UTRAN	<i>Evolved UTRAN</i> (Conjunto de estaciones base de la arquitectura LTE)
EDGE	<i>Enhanced Data rates for GSM Evolution</i> (Tasas de datos mejoradas para la evolución de GSM)
EIR	<i>Equipment Identity Register</i> (Registro de identidad de equipos)
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i> (Compatibilidad electromagnética)
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i> (Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación)
FDD	<i>Frequency Division Duplexing</i> (Duplexación por división de frecuencia)
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i> (Acceso múltiple por división de frecuencia)
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> (Transformada rápida de Fourier)
FM	<i>Frequency Modulation</i> (Modulación de frecuencia)
GGSN	<i>Gateway GPRS Support Node</i>
GMSK	<i>Gaussian Minimum Shift Keying</i> (Modulación por desplazamiento mínimo gaussiano)
GNU	<i>GNU's not Unix!</i> (GNU no es Unix!)
GPB	General Purpose Interface Bus (Bus de interfaz de propósito general)
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i> (Servicio general de paquetes vía radio)

GSM	<i>Global System for Mobile communications</i> (Sistema global para comunicaciones móviles)
HLR	<i>Home Location Register</i>
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
IP	<i>Internet Protocol</i> (Protocolo de Internet)
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i> (Evolución a largo plazo)
MATLAB	<i>MATrix LABoratory</i>
MMS	<i>Multimedia Messaging Service</i> (Servicio de mensajes multimedia)
MS	<i>Mobile Station</i> (Estación Móvil)
MSC	<i>Mobile Switching Center</i> (Centro de conmutación de móviles)
NI	<i>National Instruments</i>
NSS	<i>Network and Switching Subsystem</i> (Subsistema de red y conmutación)
OFDMA	<i>Orthogonal FDMA</i> (FDMA ortogonal)
P-GSM	<i>Primary GSM Band</i> (Banda GSM Primaria)
PDP	<i>Packet Data Protocol</i>
PM	<i>Phase Modulation</i> (Modulación de fase)
PN	<i>Pseudorandom Noise</i> (Ruido pseudoaleatorio)
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> (Modulación de amplitud en cuadratura)
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> (Modulación por desplazamiento de fase con cuatro fases)
RDSI	<i>Red Digital de Sistemas Integrados</i>

RF	<i>Radiofrecuencia</i>
RNC	<i>Radio Network Controller</i> (Controlador de la Red Radio)
SC-FDMA	<i>Single Carrier FDMA</i> (Portadora única FDMA)
SDR	<i>Software Defined Radio</i> (Radio definida por Software)
SGSN	<i>Serving GPRS Support Node</i>
SIM	<i>Subscriber Identity Module</i> (Módulo de identidad del abonado)
SMS	<i>Short Message Service</i> (Servicio de mensajes cortos)
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> (Acceso múltiple por división de tiempo)
TETRA	<i>Terrestrial Trunked Radio</i>
TTA	<i>Telecommunications Technology Association</i>
TTC	<i>Telecommunication Technology Committee</i>
UE	<i>User Equipment</i> (Equipo de Usuario)
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i> (Sistema universal de telecomunicaciones móviles)
USIM	<i>Universal Subscriber Identity Module</i> (Módulo universal de identidad del abonado)
USRP	<i>Universal Software Radio Peripheral</i>
UTRAN	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i> (Red de acceso radio terrestre de UMTS)
VI	<i>Virtual Instrument</i> (Instrumento Virtual)
VLR	<i>Visitor Location Register</i>
VSA	<i>Vector Signal Analyzer</i>
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i> (Acceso múltiple por división de código de banda ancha)

WLAN *Wireless Local Area Network* (Red de área local inalámbrica)

Extended summary

Introduction

The main goal of the present Bachelor Thesis is the implementation of an alternative instrument to the Vector Signal Analyzer. This alternative shall be powerful enough to be used in classes of any subject that may need it.

The realization of this thesis has been possible thanks to the equipment available at the Mobile Communications Laboratory at the Carlos III University of Madrid. Without those instruments, and without the help of the tutor of this thesis, it would have been impossible its completion.

This document describes in detail the different characteristics of the technologies and equipment that have been used to carry this project out. The procedure that has been followed to achieve the final goal is also explained.

Description of the Problem

The Mobile Communications Laboratory of the Carlos III University of Madrid has one Vector Signal Analyzer to be used by the teaching and academic personnel. The main disadvantage of this measurement equipment is its high price. This means that it is difficult to have more than one unit and therefore, it slows down the regular development of the subjects that need it.

Nevertheless, the Laboratory has several units of other equipment called USRP that use the Software Defined Radio technology. They are much cheaper and can be used either as a signal transmitter or as a receptor.

Thanks to them and to LabVIEW, it is possible to develop very powerful communication systems.

Suggested Solution and Goals

An SDR-based system has been used for the implementation of the work. Not only because the equipment was already available at the laboratory, but also because it is a technology in development that has a great possibility of entering the market.

It is expected to create a Vector Signal Analyzer for GSM waves with the USRPs. This has been carried out by implementing the different functionalities with the tool LabVIEW.

This work is focused on GSM signals. The choice was between it and UMTS since they are the main standards that are considered in the Mobile Communications Laboratory subject and it would be ideal to use this work for the teaching.

GSM is the beginning of the digital era in mobile phones and UMTS is its evolution. Whenever there exists a GSM analyzer, it would be easier to adapt it to UMTS rather than the other way around. Besides, the idea of going in depth in the GSM technology turned to be more attractive because knowing it helps to understand better the later technologies.

Work Planning

The Vector Signal Analyzer that is going to be developed has two parts: the hardware one, formed by the USRPs, and the software one, formed by the LabVIEW tool.

The first thing to be done before beginning the work is to learn how to use LabVIEW.

In this case, the first days were fully spent for reading the starters guide and practicing the suggested examples.

Once the guide is read, the relationship between an USRP and LabVIEW must be studied. This software includes a section with some blocks that allow to start a session with USRPs, to begin to receive waves from the air, to analyze the received signals and finally, to close the session.

It is also crucial to learn how to use the Vector Signal Generator and the program that comes together with the Vector Signal Analyzer.

Next thing is the main content of this work: the implementation of the VSA with the LabVIEW tool.

The main features of a signal that shall be obtained are the following:

- Constellation.
- Power Spectral Density and the power between two markers chosen by the user.
- The possibility that the user chooses the central frequency and it is automatically changed wherever it is needed.
- Raw Main Time signal.
- The signal demodulation with its corresponding decoding.
- Trigger to show the signal from the value chosen by the user.

State of the Art

A Vector Signal Analyzer (VSA) complements and/or may replace a spectrum analyzer. This equipment takes measures of the magnitude of a signal at the input and represents it in the frequency-domain. It should not be confused with an oscilloscope, which displays the signal in the time-domain.

The first spectrum analyzers were analog and a super heterodyne receiver that converts a part of the input signal into the central frequency.

With the discovery of the Fast Fourier Transform (FFT) and the growth of Digital Signal Processors (DSP), digital spectrum analyzers were introduced. These analyzers make use of the FFT in order to compute the spectral components of the input signal.

Nowadays the vector signal analyzers are replacing the spectral analyzers. Apart from the measures that a spectral analyzer takes, a VSA also computes modulation tasks. They are faster and more precise as well, which makes its price increase substantially.

This measuring equipment displays in a computer the behavior of an input signal, which can be either analog or digital. Depending on this and on the type of modulation that is being used, the VSA shows different parameters of the signal.

VSA in the market

Some of the main companies that design and manufacture VSAs are Keysight Technologies, which is the Agilent Technologies measures and testing part, and the German Rohde & Schwarz. Both of them have actually very powerful VSA in the market.

GSM: Introduction and Features

The GSM standard (Global System for Mobile communications) describes communication protocols for second-generation mobile phones. It is based in a cellular structure in which all the coverage area is divided in smaller areas called cells. It is assigned one frequency to each cell, and the contiguous cell frequency is assigned in such a way that the interferences among them are minimized. Thanks to this structure, the spectrum use is more efficient.

The architecture of this standard is mainly composed of three parts:

1. **Mobile Station:** Composed of the SIM card and the Terminal Equipment.
2. **Base Station Subsystem:** Composed of the Base Transceiver Station (BTS) and the Base Station Controller (BSC).
3. **Network and Switching Subsystem,** whose main component is the Mobile Switching Center (MSC).

The **modulation** used in GSM is Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) with a Bandwidth Time product (BT) of 0.3. It is considered a derivation of MSK modulation since as BT tends to 1 GMSK tends to become MSK.

According to the standard, before modulating data, a differential coding is performed following the equation:

$$y_i = x_i \text{ XOR } x_{i-1}$$

Where y_i represents coded bits, x_i are the bits to code and XOR is a modulo-2 addition.

GSM makes use of FDMA, TDMA and FDD as media access control.

Regarding the **FDD** part, the system might be able to receive and transmit simultaneously. This is why every sense of the transmission operates at different frequencies. In the case of the primary band (P-GSM) the uplink has a 25-MHz bandwidth and the same for the downlink. Regarding the extended band (E-GSM) it is 35 MHz de bandwidth for each link, and for DCS 1800, 75 MHz for each sense of the transmission.

For the P-GSM band, the 25-MHz bandwidth is divided into 124 carrier frequencies of 200 kHz each. That is how the **FDMA** is reflected. In the case of the other band, the same process is carried out, but the fact of having a larger bandwidth means that there are more carrier frequencies.

As for the **TDMA**, such carriers are divided into eight time slots allowing every user to access the media at those different times. This way, eight users in total can use the same frequency. Every user has two frequencies assigned: one for the uplink, and the other for the downlink.

One frame is composed of eight time slots, whose total duration is 4.61538 ms and time slot has 156.25 bits. Knowing this, the **bit rate** can be easily calculated and its value is **270.833 kbps**.

GSM Evolution

The evolution of the GSM standard and subsequent standards are the following:

- **GPRS**: Its main purpose is to transfer data by packet switching instead of circuit switching. The same architecture as GSM is used but adding two new nodes: the SGSN and the GGSN. The data rate is improved: 21.4 kbps for each user.
- **EDGE**: Its main goal is to increase the data rate. With this purpose, 8-PSK modulation is used allowing transmission of three times the size of GPRS transmissions with a theoretical maximum data rate of 59.2 kbps per user.

The architecture of EDGE is the same as GPRS, only changing the base station because of the different modulation type.

- **UMTS:** In this third generation technology, the media access control is based on WCDMA, so there is not temporal or frequency separation anymore. Every user needs now a code that identifies him in order to be distinguished at each different transmission. The radio links have a 5-MHz bandwidth for uplink and for downlink respectively. The UMTS architecture can coexist with GSM circuit switching part, but the rest is changed.
- **HSDPA:** Its main aim is to improve the data rate by assigning the resources to the mobile terminal that has the best channel quality.
- **LTE:** This almost-fourth-generation standard is conceived for data transmission only. Therefore, voice transmission should be voice over IP, which generates some problems when it comes to mix with other networks such as GSM. LTE makes use of OFDMA for the uplink communications and SC-FDMA for the downlink ones. The maximum offered downlink data rate is 100 Mbps, and the uplink one is 50 Mbps. LTE architecture is totally new.

Software Defined Radio

The SDR Forum defines it as the radio in which some or all of the physical layer functions are software defined.

In other words, SDR is a radio communications system in which the components that are usually implemented with hardware are now implemented with software in a computer or an embedded system. So, the main purpose is to remove hardware and put software as close to the antenna as possible.

In this Bachelor Thesis the Vector Signal Analyzer (hardware) is being replaced by a system designed with LabVIEW.

One of the **drawbacks** of the systems based on hardware is that they can only be modified by physical interventions. This increases the production cost and provides low flexibility to the system.

Nevertheless, the Software Defined Radio offers a solution to this problem. Its main **advantage** is that it makes the communications systems reconfigurable and their updates and repairs can be made wirelessly.

Since the SDR systems have less hardware components, it is less probable that they fail. Besides, the problem of such components becoming old disappears, which represents an economical saving because there is no need of replacing them for newer units.

Nowadays, the SDR technology is used in military **applications** such as detection of radars or creation of secure communication systems.

SDR may be used for future applications in different domains such as personal communications – mobile communications and WiFi –, public security – sensors manufacturing –, and digital television and radio broadcasting.

Any SDR-based system shall evolve to a Cognitive Radio (CR). The communication systems in these radios are aware of its internal state and the surrounding environment. Its main goal is to share and make the most of the frequency spectrum. For this purpose, it first must detect which frequencies are not being used. Then, it has to decide a fair way of distribute them among all the users, depending on the service quality that they need.

For the development of a system, a software defined radio receptor or transmitter is needed apart from a software tool that emulates the hardware that is to be replaced.

There exists a long list of software defined radio receivers or transmitters. The Universal Software Radio Peripheral (USRP) is found among them. According to National Instruments – the company that designs and sells them – it is possible to create a very powerful communication system using them together with LabVIEW and a computer.

These instruments are expected to be an affordable hardware platform for software radio. This is the reason why it is very usual to find them in universities and laboratories.

Developed Tool

Implemented Analyzer

If the input signal of the VSA is digital, its constellation is represented, as well as its power spectral density, the received bits and a wide range of options among which the raw main time signal can be selected.

For the digital demodulation settings, the program allows to choose among some predefined standards such as GSM, EDGE, WCDMA, Bluetooth, WLAN or TETRA.

Regarding the graphs display, it is possible to choose the central frequency for the case of the power spectral density, to change the axes scales, its units and to employ triggers or marks, to the user liking.

If the input signal is analog, its power spectral density is shown, its probability density function and the raw main time signal.

While the analyzer is receiving the signal, there exists the possibility of pausing this reception in order to see with more detail any of the graphs.

The implemented analyzer has much more features that have not been named because are not important for this thesis.

Equipment

- **LabVIEW:** It is the acronym for Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench. This software is conceived for designing graphically programmed systems. The programs designed with it are called virtual instruments.
- **NI USRP-2920:** A USRP is a transceiver that supports circuits designed with LabVIEW. This specific model can be connected to the computer through a Gigabit Ethernet interface. It has been used as a receptor by connecting to it an antenna, the VERT2450.
- **Computer:** A computer from the Laboratory with LabVIEW installed has been used. Thanks to it, the necessary virtual instruments could be

designed. Besides, a second computer was used together with the VSA and its software in order to see the results that were expected to obtain.

- **Vector Signal Generator Agilent E4438C:** This equipment has been the GSM signals transmitter, whose signals were received by the USRP and then analyzed.
- **Vector Signal Analyzer 89600S:** This analyzer is the main goal of this Bachelor Thesis.

Regulation

The equipment used at the Laboratory fulfills the **conformity marking CE**, which shows the conformity of a certain product with the requirements that are essential for its commercialization inside the countries of the European Economic Area.

Besides, this equipment may follow some standards in security and in Electromagnetic Compatibility (EMC).

Concerning the **security** at the laboratory, the requirements established by the **EN 61010-1** standard should be followed.

Regarding the **EMC**, which allows reducing the coupling effect among electric and electronic devices, there are two standards that are followed by the equipment that has been used:

- **EN 61326-1**, which focuses on equipment for laboratory use, to measure and test and to control
- **EN 55011**, whose scope is industrial, scientific and medical equipment, apart from household equipment designed to generate radio frequency energy.

Since the implemented analyzer uses equipment that fulfils the regulation, it also does.

Testing and Validation

Demodulation

LabVIEW has a block that allows performing MSK demodulation. This block was used to make the GMSK demodulator that is needed in GSM, but some changes were made, which are shown in the appendix A where the block diagrams can be seen.

To check the correct operation of the demodulator, the Vector Signal Generator was configured transmitting easy patterns such as 4 1's & 4 0's or 8 1's & 8 0's. Even though there is a decoder together with the MSK block, it was not used at the beginning because the transmission from the generator was made without the differential encoding, just to make sure that the decoder did not interfere with the obtained results.

At first, the received bits seemed to be correct at the output of the demodulator. Then, the decoder was used but the bits at its output were not the expected ones. So, the decision of implementing an own decoder was made, in case the MSK decoder had something different to a GSMK decoder.

After implementing it and testing it, there was no doubt it worked perfectly. Nevertheless, bits at its output were still incorrect. It was at this moment when the demodulator was tested again to check it worked 100% fine.

It could be observed that only tests with patters were made, and it was not enough. When normal or not so random frames were generated –110111011101 or 001000100010, for instance – the desired bits were not received.

It turned that the reason for this was that the sampling rate was not correct.

Some tests were performed changing the number of samples at the demodulator input with respect to the corresponding to the sampling rate, in case the problem was in the samples needed by the demodulator.

$$\text{Samples per symbol} = \frac{\text{Sampling rate}}{\text{Symbol rate}}$$

After these tests, the conclusion was that the number of samples at the input of the demodulator had to correspond with the previous equation – taking into account that the symbol rate in GSM is 270.833 ksymbols/s. Nevertheless, this parameter is not sufficient for a good reception, because when using the sampling rate equal to $541.666 \cdot 10^3$ samples/s, the received pattern did not coincide with the transmitted one.

Therefore, the testing went on. Now, the pattern was changed for the different considered sampling rates.

As a conclusion of this last test, when the lowest sampling rate is used, only patters that do not change for 8 or more bits in a row are correctly received. Otherwise, they are received with errors. In order to receive patterns whose bits are different every time, it is necessary to use a **sampling rate of $4.3333 \cdot 10^6$ samples/s**.

Decoding

Even though the MSK demodulation block comes together with a decoder, it was decided to implement a new one. This decision was made because the results of the first tests, after using this decoder, were not as expected. Nevertheless, as it was explained in the previous section, the failure was in de demodulator and not in the decoder.

The developed decoder was independently tested, with random bits at the input, and it worked perfectly.

However, the outcome of the first tests was still not correct. After some failed tries, **the polarity of the bits was inverted** at the generator. With this option, the received bits at the output of the decoder were already correct.

Obviously, a GSM signal received from the air is not going to have the bits inverted, so this option might be handled from the receptor. A new input called “Inversion Bits” was added to the demodulation block. When it is disabled for the user, it is actually performing the inversion that is needed for the bits to be correctly received.

The displaying of these decoded bits has also been improved, since by default they were represented as an array. Now, they are shown inside a square as a characters string. This makes it easier to differentiate the output patterns.

Constellation

A constellation is the representation in the complex plane of a signal that has been digitally modulated. The dots that are displayed in such plane represent the symbol states in the digital modulation schemes.

These symbols have a real and a complex component, which are its amplitude and phase respectively. The first one is represented over the x axe or “I”, and the second one, over the y axe or “Q”.

In order to get those components from the received signal by the USRP, there exists a block in LabVIEW called “*MT IQ to XY Graph*” that separates the real and imaginary components of every signal sample. If those components are represented in a graph, the desired constellation is obtained.

Power Spectral Density

LabVIEW has a virtual instrument that is useful to compute the PSD of a signal.

It has an input that gives the output in decibels. At first, it was activated even though the VSA program displays the PSD in dBm.

Nevertheless, the unit display was afterwards improved in order to see the PSD either in dBW, in watts or in dBm.

Besides, a frequency controller has been added to the user interface for him to change it to his liking. This frequency is automatically changed at the PSD graph whenever the controller is changed.

In order to obtain the **power between two cursors**, a button has been created which generates two of them on the PSD graph when pressed. These appear at the same position on the graph, but they can be moved with the mouse wherever it is desired.

This is an advantage regarding the original analyzer because its program does not allow having more than one cursor in the same graph and it does not show the frequency position when showing a PSD Band.

To carry out this task, the FFT of the received signal has been performed and the coordinates axe was correctly placed.

In order to check that this process was properly implemented, it was tested independently by simulating a sinusoidal signal with the virtual instrument called “*Simulate Signal*”. When it is places at the block diagram, a new window appears where the signal frequency, the sampling frequency and the number of samples can be specified. After checking that the corresponding block diagram was correctly implemented, it was placed in the general virtual instrument. The Y axe was also scaled because in order to show the actual magnitude, the total number of samples should divide the values, and the FFT was shifted as well.

Besides, there exists the drawback that the USRP converts any received signal into baseband so the energy of the carrier frequency was not taken into account in the first measurements. The conclusion after some experiments is that 68 dBm shall be subtracted to the experimental measure.

The procedure to calculate the power was to compute the absolute value and the square of the FFT vector. By adding those values among the indexes corresponding to the cursors, previously calculated, the power between them is calculated.

Trigger

A basic trigger has been implemented. It simply stops the Raw Main Time signal whenever its value is over a threshold specified by the user. As soon as the signal value is again below the threshold, the signal is again shown in real time.

Socioeconomic environment and budget

The fulfillment of this Bachelor Thesis has a great social purpose because it is oriented to the teaching. Besides, the fact of replacing physical equipment by a software-designed system has an economic impact in the University economy. It does not suppose a direct money savings because the VSA is already purchased, but it does improve the situation of only having one of them, by removing the need of investing money in more units.

The budget of this Thesis is calculated in this section as well. It must be taken into account that it is just an approximation and can be modified depending on the purchasing place or on the number of units acquired.

In order to calculate the personnel budget, the duration of the work has been considered as six months, working 4 hours a day as average.

- The **equipment costs** amounts to: **3309.70 €**
- The **software costs** amounts to: **272.40 €**
- The **personnel costs** amounts to: **20,664 €**
- The **indirect costs** amounts to: **4849.22 €**

The **total budget** amounts to twenty-nine thousand ninety-five euros with thirty-two cents (**29,095.32 €**)

Conclusions and Improvements

The goal of this Bachelor Thesis was the implementation of a Vector Signal Analyzer for GSM signals by using Software Defined Radio.

It has been possible to implement the main features of a signal and its validity has been tested with different test already exposed.

It would have been ideal to make it able to receive real GSM signal from the nearest base station to the USRP receptor. Indeed, some tests were made by trying frequencies among 945 and 946 MHz. At 945.6 MHz a constellation was received and in the raw main time signal the 8 different channels were differentiated.

However, this test does not make the analyzer an adequate receiver of GSM signals of any base station, as the received bits cannot be verified to be correct.

Regarding the acquired knowledge along this work, they are based on the graphical programming that is needed for using LabVIEW. Besides, it has been possible to work with instruments that are not very used along the degree. The possibilities that a Vector Signal Generator offers have been studied, as well as the Vector Signal Analyzer.

In addition, the Software Defined Radio has been also studied, a technology almost unknown for the students of this Degree on Telecommunication Technologies Engineering. Its potential and development ability have been discovered.

As for the **future improvements**, the main and more interesting improvement would be to qualify the receptor for receiving signals from the nearest base station. This can be done, for instance, allowing it to try all frequencies inside a range, and when the best reception is achieved, showing the already implemented features of the signal.

Besides, the signals reception can be extended to UMTS or LTE. For this, it would be necessary to change de demodulator.

It would be interesting to make a bit-pattern search possible within the received bits. In addition, it would be a good idea to improve the graphic interface. All buttons and boxes can be customized in order to make them more attractive. Colors and graphs grids can be change as well.

Implementación de un analizador vectorial para señales GSM mediante equipo Software Defined Radio

1 INTRODUCCIÓN	30
2 ESTADO DEL ARTE.....	35
3 GSM	39
4 SOFTWARE DEFINED RADIO	53
5 HERRAMIENTA DESARROLLADA.....	57
6 ENTORNO SOCIOECONÓMICO Y PRESUPUESTO	82
7 CONCLUSIONES Y MEJORAS	85
REFERENCIAS.....	88
ANEXOS	93

1 Introducción

El nacimiento de este Trabajo Fin de Grado surge como la idea de crear una alternativa a un Analizador Vectorial de Señales que sea lo suficientemente potente para poder hacer uso de él en la docencia de asignaturas que lo necesiten.

La realización de este trabajo ha sido posible gracias al equipo disponible en el Laboratorio de Comunicaciones Digitales de la Universidad Carlos III de Madrid. Sin estos instrumentos, y sin la ayuda del tutor de este trabajo, habría sido imposible su finalización.

Este documento detalla las diferentes características de las tecnologías y equipos empleados para llevar a cabo este trabajo, relacionados con las telecomunicaciones, además del proceso que se ha seguido para alcanzar el objetivo.

1.1 Descripción del problema

El Laboratorio de Comunicaciones Móviles de la Universidad Carlos III de Madrid cuenta con un analizador vectorial de señales para su uso del personal tanto docente como académico. El inconveniente de este equipo de medición de señales es que es muy costoso, rondando los 250000€ , y por tanto es difícil contar con más de un ejemplar. Esto dificulta y ralentiza en muchas ocasiones el desarrollo con normalidad de algunas asignaturas en las que hay que utilizarlo, pues tiene que haber turnos entre los estudiantes y no pueden realizar los ejercicios o prácticas simultáneamente.

Sin embargo, el Laboratorio dispone de varias unidades de otros equipos llamados USRP (Universal Software Radio Peripheral) que se basan en la tecnología Software Defined Radio. Son mucho más económicos y sirven como transmisores o receptores de señales.

Con ellos es posible crear sistemas de comunicación muy potentes gracias a la ayuda del software LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench), con el que son totalmente compatibles.

1.2 Solución propuesta y objetivos

Para la implementación del trabajo se ha utilizado un sistema basado en Software Defined Radio, no solo porque fuese un equipo con el que ya se contaba en el laboratorio, sino también porque es una tecnología que está en proceso de crecimiento y que tiene una gran posibilidad de hacerse un hueco en el mercado, pues hasta ahora, en los campos donde se ha usado, ha solucionado exitosamente todos los problemas. Como ejemplo a esto, la tecnología SDR ha sido útil en el terreno militar para el despliegue de aplicaciones de defensa.

Lo que se pretende con los USRP es crear un analizador vectorial de señales para ondas GSM. La manera de llevar a cabo este propósito ha sido implementando con la herramienta LabVIEW las diferentes funcionalidades del analizador original.

Este trabajo, como ya se ha mencionado anteriormente, se centra en las señales GSM. La elección estaba entre GSM y UMTS ya que estos son los principales estándares que se estudian en la asignatura de Laboratorio de Comunicaciones Móviles y lo que se desea es que la implementación de este trabajo pueda utilizarse más adelante en la docencia.

GSM es el comienzo de la era digital en los teléfonos móviles y UMTS es su evolución. Teniendo un analizador de ondas GSM ya implementado resulta más fácil ampliarlo a señales UMTS, que empezar de cero un analizador para UMTS y luego adaptarlo a GSM. Además de esto, la idea de profundizar en la tecnología GSM resultó más tentadora porque conocerla ayuda a comprender mejor y más rápidamente el resto de tecnologías posteriores.

1.3 Planificación del trabajo

El analizador vectorial que se va a desarrollar consta de dos partes: una hardware formada por los USRP y otra software, por el programa LabVIEW.

Para comenzar a realizar este trabajo, lo primero que hay que hacer es aprender a utilizar el software LabVIEW.

En este caso, al no haber empleado nunca la programación gráfica o por bloques, los primeros días fueron dedicados a leer la guía de comienzo de este programa y a practicar los ejemplos propuestos.

Una vez leída y vistos algunos tutoriales de la página web de National Instruments, donde se explican detalladamente muchas funciones de este software, hay que comenzar a estudiar la relación entre el USRP y LabVIEW. Este incluye un módulo con bloques que permiten empezar una sesión con estos dispositivos, comenzar a recibir ondas del aire, analizar las señales recibidas, y luego cerrar la sesión.

También ha sido primordial aprender a utilizar el generador de señales y el analizador vectorial de señales junto con el programa que incorpora para ordenador.

A continuación es cuando se realiza el contenido esencial del trabajo, que es la implementación del analizador vectorial de señales con la herramienta LabVIEW.

Una generalización de las características de la señal que hay que obtener, es la siguiente:

- Constelación.
- Densidad espectral de potencia y la potencia comprendida entre dos marcadores que elija el usuario.
- La posibilidad de que el usuario escoja la frecuencia central y que automáticamente se cambie donde sea oportuno.
- La señal en tiempo (Raw Main Time).
- La demodulación de la señal con su correspondiente decodificación, puesto que la señal que el USRP recibe del aire está modulada y codificada.
- Disparador para mostrar la señal a partir del valor que elija el usuario.

Diagrama de Gantt

A continuación se ilustra con un diagrama de Gantt la duración de cada tarea. La tabla muestra las tareas cronológicamente:

Tarea	Fecha inicio	Fecha fin
Tutoriales LabVIEW y familiarización con el equipo	21/Feb/2014	27/Feb/2014
Constelación, Densidad espectral de potencia y señal en tiempo real	27/Feb/2014	04/Abr/2014
Demodulación	04/Abr/2014	25/Jun/2014
Decodificación	20/May/2014	21/Jul/2014
Potencia comprendida entre dos marcadores	28/Jul/2014	16/Sep/2014
Redacción de la memoria	20/May/2014	22/Sep/2014

Tabla 1-1: Tabla de tareas que componen el trabajo

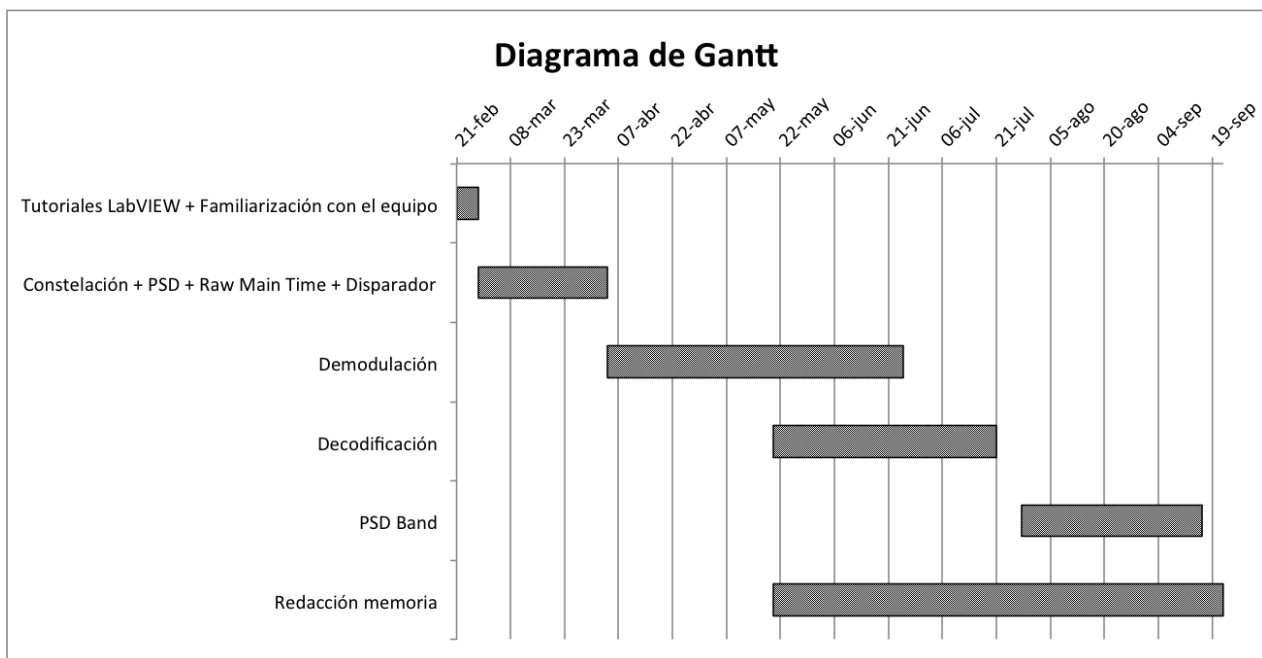


Figura 1-1: Diagrama de Gantt

1.4 Estructura de la memoria

El contenido de esta memoria se puede ordenar en diferentes secciones.

En la **Introducción** se ha expuesto el problema del cual se parte para realizar este trabajo, y la solución que se propone, así como la planificación que se sigue para llevarlo a cabo y los objetivos a los que se pretende llegar. También se incluye un diagrama de Gantt en el que se refleja la duración de las tareas realizadas.

A continuación, en el **Estado del arte** se hablará de los comienzos de los analizadores de espectro hasta su evolución, los analizadores vectoriales de señales. Se analizan algunos analizadores que hay en el mercado y se habla de la empresa National Instruments.

En el capítulo 3, **GSM**, se contarán las características sobre el estándar GSM así como de sus sucesivos estándares. Se continúa con la sección **Software Defined Radio** donde se profundizará en esa tecnología y más concretamente, en los USRP (Universal Software Radio Peripheral).

En el **capítulo 5** se detallarán las características de la **herramienta desarrollada**. Además, se describirá detalladamente el equipo utilizado a lo largo del proceso y se incluirán en un marco regulador tanto de seguridad como de compatibilidad electromagnética. Finalmente se describirán las pruebas realizadas para comprobar cada avance del trabajo, así como la manera de llegar al resultado definitivo de cada parte que compone el trabajo. Se añadirán datos, tablas y figuras que muestran los resultados obtenidos.

Más tarde se incluye un **presupuesto** del trabajo y se enmarca en un **entorno socioeconómico**. Este apartado se dedicará a extraer los fines sociales y económicos del Trabajo realizado, así como a detallar los costes derivados de su implementación. A continuación se extraerán las **conclusiones** del trabajo realizado y se propondrán algunas **mejoras** de la implementación del analizador. Para finalizar, en las **referencias** se recopilan las diferentes fuentes de las que se ha hecho uso para poder escribir este documento.

Al final del documento se incluye una serie de anexos. En el primero se reúnen los **diagramas de bloques** de todos los módulos necesarios para implementar el demodulador. El siguiente es un **manual de utilización del analizador implementado**, donde se muestra qué debe hacer el usuario cuando quiera emplearlo. El último anexo se dedicará a explicar paso a paso cómo **configurar el programa del Analizador Agilent** para poder usarlo como referencia y saber cuáles son los resultados esperados en el analizador implementado.

2 Estado del arte

2.1 Analizadores de espectro y su evolución

Un analizador vectorial de señales complementa y/o permite reemplazar a un **analizador de espectros**. Este equipo mide la magnitud de una señal en la entrada y la representa en el dominio de la frecuencia en una pantalla que tiene integrada. No hay que confundirlo con un osciloscopio, pues este muestra la señal en el dominio del tiempo.

Los primeros analizadores de espectro eran analógicos y constan de un receptor superheterodino que convierte una parte de la señal de entrada en la frecuencia central.



Figura 2-1: Analizador de espectro

Con el desarrollo de la **Transformada rápida de Fourier** (FFT, del inglés Fast Fourier Transform) y los avances en los procesadores digitales de señales (DSP) se introdujeron los analizadores de espectro digitales. Estos hacen uso de la FFT para hallar las componentes espectrales de la señal de entrada.

Hoy en día los analizadores de espectro están siendo reemplazados por **analizadores vectoriales de señales** (AVS). Además de las medidas que toma un analizador de espectro, los AVS pueden realizar tareas de demodulación y otras más complejas como medidas o sincronización. También son más precisos y rápidos, debido a lo cual su precio aumenta significativamente [1].

Este equipo de medición muestra en un ordenador el comportamiento de una señal en la entrada, que puede ser analógica o digital. Dependiendo de esto y del tipo de modulación que se esté usando, el AVS permite visualizar diferentes parámetros de la señal, muchas veces imprescindibles para la caracterización de dispositivos electrónicos transmisores.

2.2 AVS del mercado

Keysight Technologies

Desde 2013 la compañía americana Agilent Technologies llama Keysight Technologies a la parte de pruebas y medidas electrónicas.

El último AVS que ha sacado al mercado es el **M9393A PXIe Performance Vector Signal Analyzer**, cuyo rango de frecuencia de trabajo es mucho más amplio que el de sus predecesores. Este analizador soporta tecnologías analógicas, celulares, digitales y también WLAN [2].



Figura 2-2: Vista lateral del AVS de Keysight Technologies

Rohde & Schwarz

Esta compañía nacida en Alemania se dedica desde 1933 a producir equipos electrónicos de medida, entre otros. Unos de sus productos destacados dentro de este campo es el **R&S®FSV Signal and Spectrum Analyzer**, que soporta tecnologías como [3]:

- WLAN 802.11a/b/g/j/p/n/ac
- WCDMA/HSPA/HSPA+
- 3GPP LTE
- GSM/EDGE
- AM
- FM
- PM



Figura 2-3: Vista frontal del analizador de espectros de Rohde & Schwarz

2.3 National Instruments

National Instruments (NI) es una compañía americana que fue fundada en Texas en 1976, donde se encuentra su oficina central.

Su primera creación fue un bus de datos, el GPIB (General Purpose Interface Bus) para conectar instrumentos a los ordenadores IBM. Sin embargo, su principal producto, LabVIEW, fue creado a raíz de la aparición de los ordenadores Macintosh. Se creó en la década de los 80 y salió al mercado en 1986. Esta plataforma fue diseñada para permitir a los ingenieros programar gráficamente con la simple unión de cables con iconos [4].

Es entonces cuando NI se desplegó internacionalmente abriendo una oficina en Tokyo.

La primera versión de LabVIEW solamente funcionaba con ordenadores Macintosh, pero más adelante, en 1992, se pusieron a la venta las versiones para Windows y Unix [5].



Figura 2-4: Logotipo de National Instruments

Aparte de la instrumentación virtual, la empresa se dedica sobre todo al mercado de la adquisición de datos, el control de instrumentos y automatización industrial y la instrumentación electrónica.

Sus grandes competidores son Agilent en el caso de instrumentación electrónica y Siemens en cuanto a automatización industrial.

National Instruments es pública desde 1995 y hoy en día tiene oficinas en más de 40 países [6].

3 GSM

3.1 Breve introducción

El estándar GSM (Global System for Mobile communications) describe protocolos de comunicación para teléfonos móviles de segunda generación (2G) [7]. La principal diferencia entre la primera (1G) y la segunda generación es que las señales usadas por las redes 1G son analógicas y las usadas por redes 2G son digitales [8]. Esto implica ciertas ventajas como que se hace un uso del espectro más eficiente; además este estándar introdujo servicios de envío de datos como SMS (Short Message Service) o MMS (Multimedia Messaging Service), cuya información se cifra digitalmente de tal forma que solamente el receptor pueda disponer de ella en claro [9].



Figura 3-1: A la izquierda, logotipo de GSM hasta el año 2000 y a la derecha, a partir de entonces [10]

3.2 Descripción general

Este estándar se basa en una **estructura celular** en la que toda el área de cobertura se divide en áreas más pequeñas denominadas **celdas**, y a cada una de estas se le asigna una sola frecuencia. Las frecuencias de las celdas contiguas son elegidas de tal forma que minimicen las interferencias entre sí. La **distancia co-canal** o distancia de reutilización es la distancia que hay entre dos celdas que utilizan la misma frecuencia. Gracias a esta estructura se mejora la capacidad del sistema y se aprovecha el espectro mucho más.

El conjunto de celdas que cubre todo el ancho de banda del sistema se denomina **cluster** o racimo.

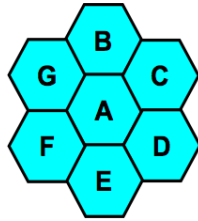


Figura 3-2: Cluster en el que cada letra indica una frecuencia diferente [11]

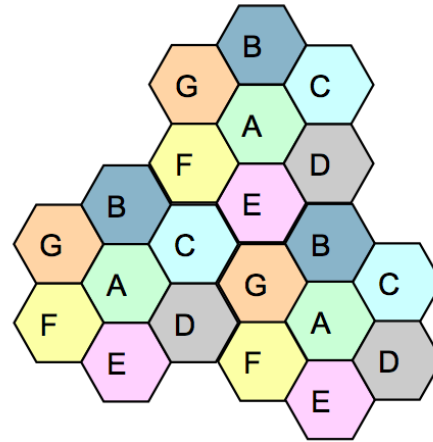


Figura 3-3: Conjunto de clusters en los que se puede apreciar el concepto de reutilización de frecuencia: Las celdas que tienen la misma letra tienen asignada la misma frecuencia [11]

En cuanto a las frecuencias en las que opera GSM, se distinguen tres bandas cuyas características se característcas se resumen en la

Tabla 3-1.

Estas son las utilizadas en mayor parte del mundo: Europa, Oriente Medio, África, Australia, Oceanía, y casi toda Asia.

1. Banda GSM 900 primaria, P-GSM
2. Banda GSM 900 extendida, E-GSM
3. Banda DCS 1800

Banda	Frecuencia enlace de subida [MHz]	Frecuencia enlace de bajada [MHz]
P-GSM 900	890-915	935-960
E-GSM 900	880-915	925-960
DCS 1800	1710-1785	1805-1880

Tabla 3-1: Frecuencias de operación de las bandas GSM

Arquitectura

El esquema general de la arquitectura de GSM es el siguiente:

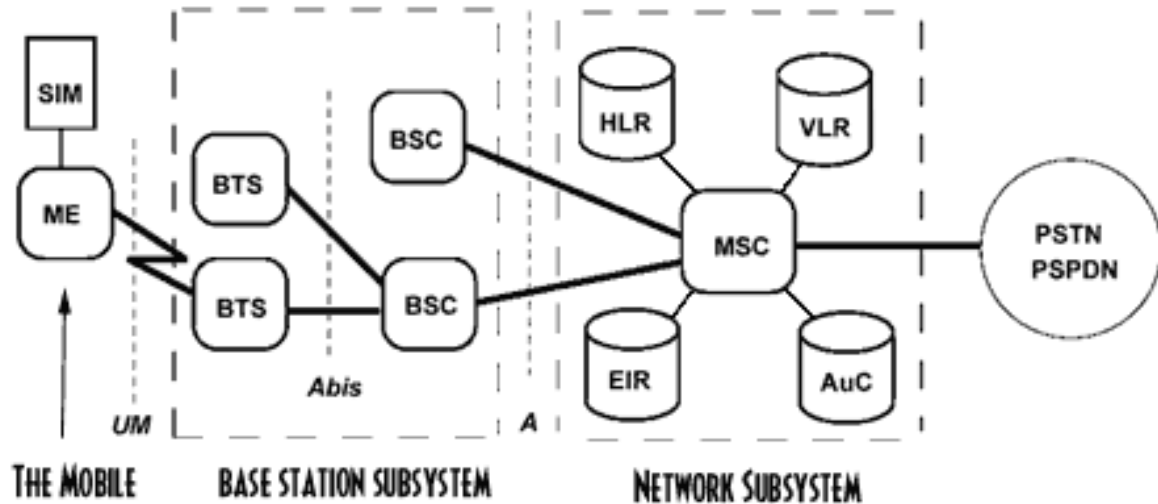


Figura 3-4: Esquema general de la arquitectura GSM [12]

Como se puede observar, la red general de GSM se divide en diferentes partes [13]:

1. **Estación Móvil** (Mobile Station, MS). Se compone de la tarjeta SIM y del terminal móvil, que es el equipo físico. La SIM es un circuito integrado que protege las comunicaciones del usuario y le permite disfrutar de los servicios contratados independientemente del lugar y del terminal móvil ya que almacena toda su información de suscripción. Se encarga de la autenticación del usuario.
2. **Subsistema de estaciones base** (Base Station Subsystem, BSS). Está compuesto por la BTS (Base Transceiver Station), normalmente llamada solamente estación base, y el BSC (Base Station Controller). La BTS es el conjunto de las antenas y transceptores que se usan en cada celda de la red. El área de cobertura de la BTS es el área de la celda; esto significa que hay una BTS por celda. Tiene que ser capaz de comunicarse con el terminal móvil y con el BSC, y de gestionar ambos enlaces.

Por otro lado, el BSC es el controlador de una o más estaciones base: hace los cambios entre ellas cuando un usuario se desplaza de celda (handover), gestiona los recursos de la red para distribuirles los canales, y se encarga de

“transformar” los canales del radioenlace U_m a canales terrestres del enlace A. En otras palabras, el BSC es la conexión entre el terminal móvil y el MSC.

3. Subsistema de red y conmutación (Network and Switching Subsystem, NSS).

Su componente principal es el MSC (Mobile Switching Center), que se encarga de gestionar las llamadas entre usuarios, es decir, de terminal móvil a terminal móvil. También establece conexiones con otras redes tales como la Red Telefónica Conmutada o la RDSI (Red Digital de Servicios Integrados). El NSS también consta de varias bases de datos:

- **HLR** (Home Location Register): almacena información permanente y temporal de los suscriptores, como la localización.
- **VLR** (Visitor Location Register): guarda la información de los suscriptores que están activos en el área de control del MSC.
- **EIR** (Equipment Identity register): reúne los datos de todos los terminales móviles que pueden acceder a la red para evitar que los terminales robados hagan uso de ella.
- **AuC** (Authentication Center): guarda información relacionada con la seguridad y la identidad del suscriptor, como una copia de las claves de cifrado y autenticación.

3.3 Capa física

Esta capa se trata en detalle porque es la que tiene en cuenta las características físicas de la red necesarias para generar una señal adecuada que sirva para transmitir la información que llega desde el nivel de enlace, así como para recibir una señal que llega de la red [14].

Modulación

La modulación empleada en GSM es GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) con un valor BT (Bandwidth Time product) de 0,3 y se considera una derivación de la modulación MSK, pues a medida que BT tiende a 1, GMSK tiende a convertirse en MSK. El valor del producto BT indica la forma del filtro gaussiano del modulador, y cuanto menor sea, la energía del espectro de la señal resultante estará concentrada en una banda de frecuencia más pequeña. Los lóbulos laterales del espectro se reducen con

respecto al de MSK porque los datos a modular se pasan previamente por dicho filtro gaussiano [15].

Codificación diferencial

Según el estándar, antes de modular los datos $x_i = [0, 1]$, se realiza una codificación diferencial. La salida del codificador diferencial es [16]:

$$y_i = x_i \text{ XOR } x_{i-1}$$

Donde y_i representan los bits de información codificados, x_i los bits a codificar y XOR es una suma módulo 2.

Para calcular el bit y_0 necesitamos los valores x_0 y x_{-1} . Hay que tener en cuenta que antes de que el primer bit entre en el modulador, este tiene un estado interno como si una ristra de 1's hubiera entrado al codificador diferencial. Por tanto, se asumirá siempre el valor 1 para x_{-1} .

Una ventaja de usar codificación diferencial en GMSK es una tasa de error de bit más baja. En esta modulación, una decisión errónea conlleva a dos bits erróneos en el receptor. La codificación diferencial ayuda a eliminar el error en el bit extra, así que en la mayoría de los casos una decisión errónea conlleva a un bit erróneo. Sin embargo hay que tener en cuenta que la codificación diferencial reduce el número neto de bits incorrectos pero no reduce el número de decisiones incorrectas.

Decodificación

La decodificación diferencial se lleva a cabo a la salida del demodulador realizando la siguiente operación con los bits recibidos:

$$x_i = y_i \text{ XOR } x_{i-1}$$

Donde x_i representan los bits de información decodificados, y_i los bits a decodificar y XOR es una suma módulo 2.

Tramas y canales

La técnica de acceso al medio empleada por GSM es una combinación de **FDMA** (Frequency Division Multiple Access), **TDMA** (Time Division Multiple Access) y **FDD** (Frequency Division Duplexing).

La parte FDD de este acceso al medio significa que el sistema ha de ser capaz de transmitir y recibir simultáneamente [17]. Para ello, cada sentido de la transmisión opera a frecuencias distintas: el enlace de subida de la banda primaria tiene un ancho banda de 25 MHz, y el de bajada, ídem. En el caso de la banda E-GSM se cuenta con 35 MHz para cada enlace, y en el de DCS 1800, con 75 MHz para cada sentido de la comunicación.

Para la banda P-GSM, los 25 MHz de ancho de banda se dividen en 124 **frecuencias portadoras** de 200 kHz cada una. Es aquí donde se ve el FDMA. En el caso de las otras bandas se hace lo mismo, pero al disponer de más ancho de banda, se dispone de más frecuencias portadoras.

En cuanto al TDMA, dichas portadoras son, a su vez, divididas en ocho **ranuras de tiempo** permitiendo así a cada usuario acceder al medio en estos distintos momentos temporales. De esta forma, un total de ocho usuarios puede usar la misma frecuencia portadora. Cada usuario tiene dos frecuencias asignadas: una en el enlace de subida y otra, en el de bajada.

Ocho ranuras de tiempo, o ráfagas, componen una **trama**, cuya duración es de 4,61538 ms. Por lo tanto, la duración de cada ranura es de 576,9225 μ s y además, ocupa 156,25 bits. Sabiendo esto, se puede calcular la tasa de bits fácilmente:

$$Tasa\ de\ bits = \frac{156,25\ bits/ranura}{576,9225\ \mu s/ranura} = 270,833\ kbits/s$$

Existen diferentes tipos de ráfagas cuya organización de los bits difiere dependiendo de su finalidad:

- Ráfaga de corrección de frecuencia
- Ráfaga de sincronización
- Ráfaga de acceso aleatorio

- Ráfaga normal
- Ráfaga “dummy”

La estructura de una ráfaga normal adopta el siguiente esquema:

	Tail Bits	Información	Flag	Bits de entrenamiento	Flag	Información	Tail Bits	Banda de guarda
Nº bits	3	57	1	26	1	57	3	8,25

Tabla 3-2: Esquema de una ráfaga normal

Una ráfaga es la unidad básica que define un **canal físico** en GSM.

La estructura que siguen las tramas es la siguiente:

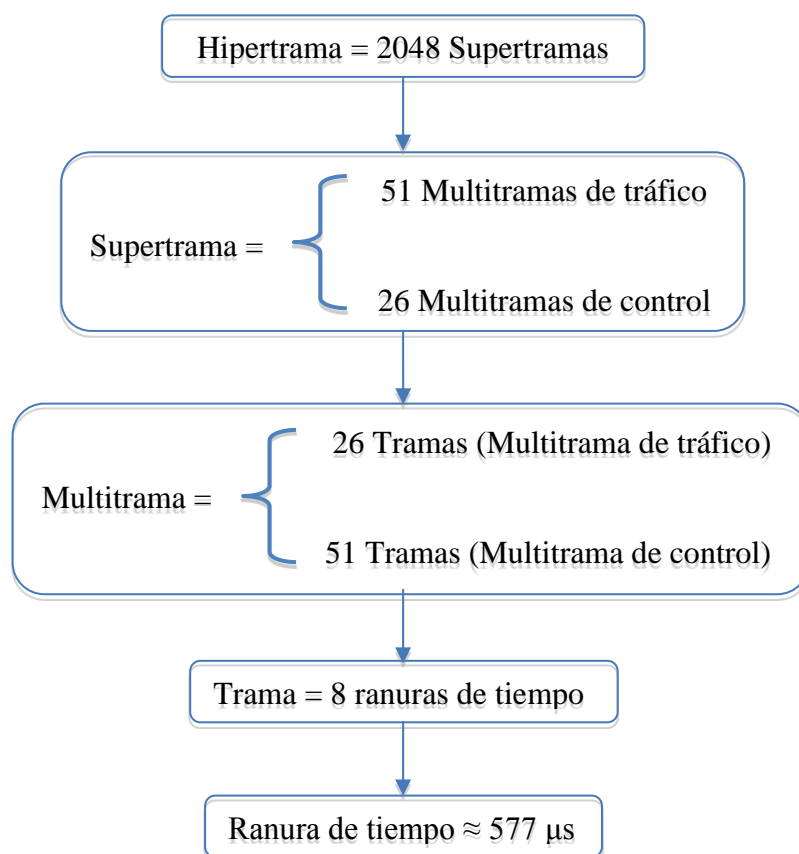


Figura 3-5: Estructura de las tramas en GSM

La multiplexación de los canales físicos da lugar a **canales lógicos**, que definen el tipo de información que se envía por dichos canales físicos. Básicamente, hay dos tipos de información: tráfico o control.

Los **canales de control**, también conocidos como canales de señalización, contienen la información necesaria para garantizar que una estación móvil acceda a la red además de la sincronización, la corrección de frecuencia o el roaming.

Por otro lado, **los canales de tráfico**, son los que transportan voz o datos. Estos siempre van asociados a un canal de señalización para controlar la llamada.

Originalmente, GSM soporta una tasa de transmisión de datos **9,6 kbps** en una sola ranura de tiempo. Sin embargo, a lo largo de los años se han llevado a cabo ciertas mejoras del estándar para ofrecer mejores tasas.

3.4 Evolución de GSM

2.5G: GPRS

La evolución más inmediata de GSM es GPRS (General Packet Radio Service). Se puede considerar como una extensión de GSM cuyo principal objetivo es la transmisión de datos a través de la **conmutación de paquetes**, y no por conmutación de circuitos como permite GSM, puesto que esta práctica resulta lenta y cara.

GPRS proporciona dicha transmisión en la misma red de GSM. Para ello utiliza, sobre la misma arquitectura de GSM, una capa de red con nuevos nodos que permiten el enrutamiento de paquetes:

- **SGSN** (Serving GPRS Support Node). La función principal de este nodo es facilitar el acceso de los terminales móviles a la red de datos. Es aquí donde se realiza la autenticación de un usuario que quiere transferir datos. Se encarga del enrutamiento y transferencia de los paquetes.
- **GGSN** (Gateway GPRS Support Node): Es la interfaz entre la red GPRS y otras redes externas de paquetes conmutados, como podría ser Internet. También convierte los paquetes GPRS procedentes del SGSN en el formato PDP (Packet data Protocol) que convenga, y vice versa. Esta estructura de datos contiene información del usuario necesaria para realizar la transmisión con éxito.

Otra de las mejoras importantes de GPRS con respecto a GSM es su velocidad de transmisión, que pasa a ser 171,2 kbps teóricamente, lo que supone 21,4 kbps por usuario.

La modulación empleada sigue siendo la misma, GMSK.

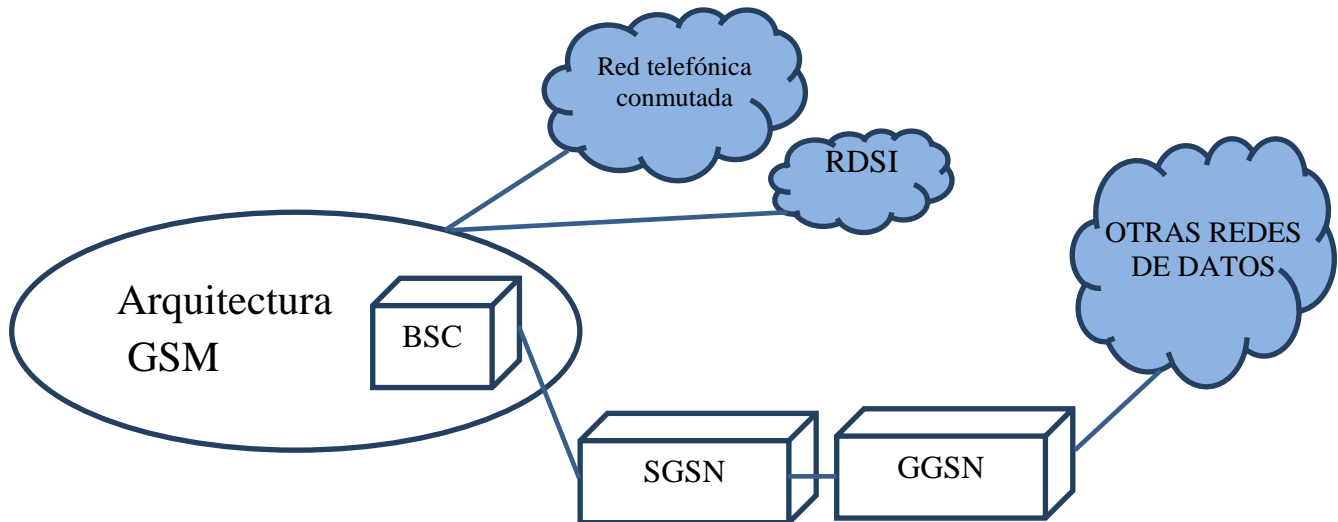


Figura 3-6: Esquema de la arquitectura GPRS

2.75G: EDGE

La necesidad de una mayor velocidad de transmisión de datos dio lugar a EDGE, la evolución de GPRS.

La modulación empleada en EDGE es 8-PSK por lo que cada símbolo necesita tres bits. Su tasa de símbolo es la misma que en GSM, aproximadamente 270 kbps, pero su tasa de bits de modulación es el triple: 810 kbps. Esto significa que gracias a EDGE se transmite **tres veces** lo mismo que en GPRS durante el mismo periodo de tiempo.

La tasa máxima teórica de transmisión de datos para ocho ranuras de tiempo es 473,6 kbps. Eso supone un máximo de 59,2 kbps por usuario.

EDGE y GPRS comparten la misma arquitectura a excepción de la estación base, que han de ser diferentes debido a que las modulaciones son distintas.

A continuación se muestra en Tabla 3-3 un resumen de los estándares 2G y los que son puente entre 2G y 3G con sus características más importantes:

Estándar	Tasa de datos por usuario	Modulación
GSM	9,6 kbps	GMSK
GPRS	21,4 kbps	GMSK
EDGE	59,2 kbps	8-PSK

Tabla 3-3: Resumen de características de estándares 2G

3G: UMTS

UMTS es una de las tecnologías de telefonía móvil de tercera generación.

Presenta una mayor capacidad para servicios básicos, como la transmisión de voz, además de una velocidad de transmisión de datos más elevada, alcanzando hasta 2Mbps en interiores.

La asignación de frecuencias para esta tecnología se ubica mayoritariamente alrededor de 2 GHz:

Zona geográfica	Enlace de subida [MHz]	Enlace de bajada [MHz]
Europa y Asia	1920 – 1980	2110 – 2170
Estados Unidos	1850 – 1910	1930 – 1990

Tabla 3-4: Asignación de frecuencias para UMTS

UMTS se basa en la tecnología de acceso al medio **WCDMA** (Wideband Code Division Multiple Access). Ya no existe separación temporal ni de frecuencia, así que todos los usuarios transmiten a la vez y con el mismo ancho de banda. Lo que se necesita ahora para distinguir cada transmisión de cada usuario es un código que se les identifica de forma unívoca. WCDMA opera con radioenlaces de 5 MHz de ancho de banda para subida y bajada respectivamente.

Las especificaciones de UMTS las genera el proyecto **3GPP** (3rd Generation Partnership Project), que es un grupo formado por varios organismos de estandarización de todo el mundo:

Zona geográfica	Organismo
Europa	ETSI
Japón	ARIB, TTC
Estados Unidos	ATIS
China	CCSA
Korea	TTA

Tabla 3-5: Organismos que componen el proyecto 3GPP

El objetivo de este proyecto es que todas las tecnologías de tercera generación sean compatibles unas con otras y con el estándar mundial para redes inalámbricas de tercera generación, el IMT-2000.



Figura 3-7: Logotipo del proyecto 3GPP [18]

La arquitectura de las redes UMTS se compone básicamente de tres elementos:

- 1. User Equipment** (UE, Equipo de Usuario). Se compone del terminal móvil y de su USIM, que es el módulo de identificación del abonado, equivalente a la tarjeta SIM.
- 2. UTRAN** (UMTS Terrestrial Radio Access Network, red de acceso radio). Se compone del **Nodo B** y el **RNC** (Radio Network Controller), equivalentes a la BTS y el BSC de GSM respectivamente, pero con algunos cambios en las funciones.
- 3. Core Network** (Núcleo de red). Se encarga de transportar la información, tanto de tráfico como de control. Posee la inteligencia del sistema: enrutamiento, control, handover, localización de los usuarios, etc.

UMTS puede coexistir con la parte de conmutación de circuitos de GSM.

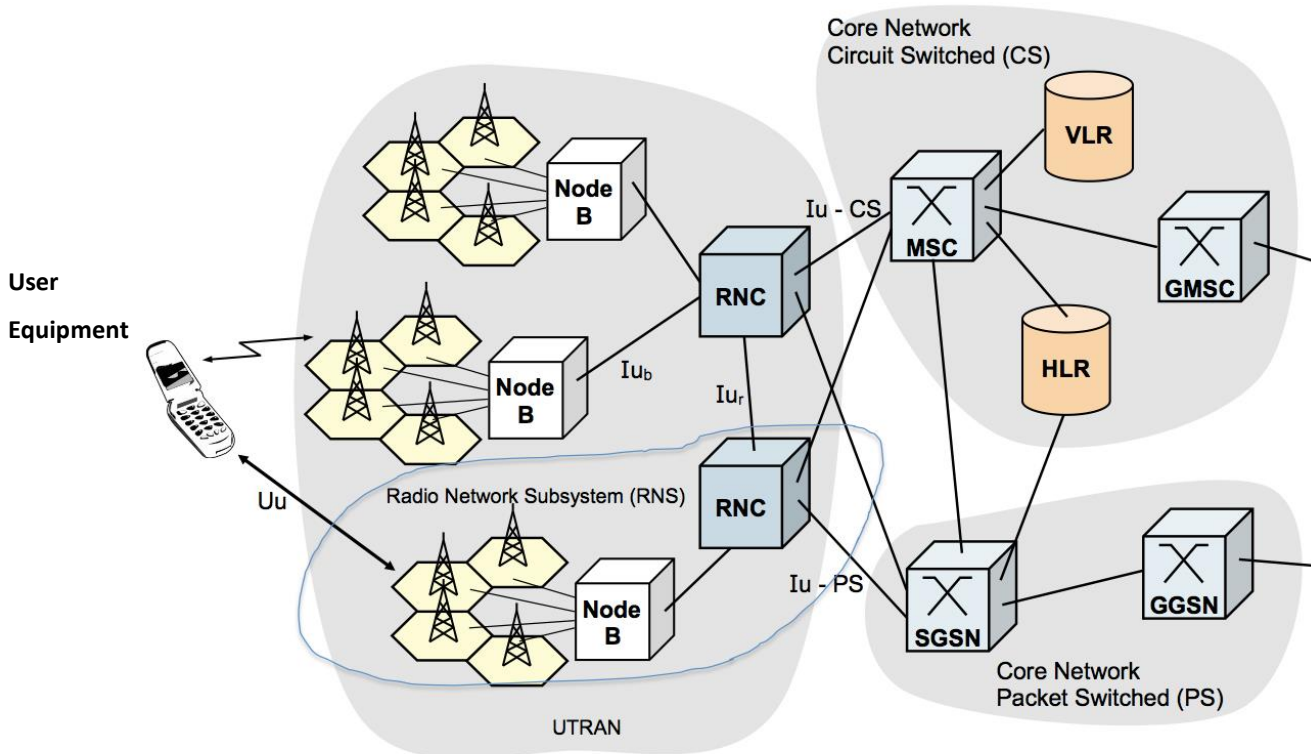


Figura 3-8: Esquema de la arquitectura UMTS [19]

3.5G: HSDPA

Esta evolución permite velocidades de datos más elevadas en el enlace de bajada, de hasta 14 Mbps.

Una de sus mejoras es que la tasa de datos es maximizada con respecto a una potencia de transmisión específica, en lugar de hacerlo al revés como sucede con UMTS. Esto suponía un gasto de energía ineficiente.

Para lograr que un terminal que está transmitiendo tenga la tasa de datos más elevada, los recursos son asignados al terminal móvil cuya calidad del canal sea la mejor en cada momento. Dependiendo de esto, se emplea una modulación u otra gracias a que HSDPA presenta una modulación y codificación adaptativas. En buenas condiciones, la modulación empleada es 16QAM o 64QAM.

4G: LTE

IMT-Advanced recopila los requisitos necesarios para que un servicio de telefonía móvil y acceso a internet sea considerado de cuarta generación.

El estándar LTE no cumple con todos estos requisitos y por lo tanto no puede ser considerado de cuarta generación. Sin embargo, su evolución, LTE-Advanced, sí los satisface. A pesar de ello, LTE es comúnmente clasificado dentro de 4G.

Este estándar está concebido únicamente para la transmisión de datos. Por lo tanto, si se quiere transmitir voz, ha de ser voz sobre IP. Sin embargo, esto genera problemas a la hora de mezclarse con otras redes tales como GSM.



Figura 3-9: Logotipo de LTE [18]

LTE utiliza, para las comunicaciones del enlace descendente, **OFDMA** (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) como técnica de acceso al medio. Esto permite asignar a un mismo usuario un número de subportadoras durante una cantidad de tiempo predeterminada. Esto proporciona robustez al enlace frente a interferencias y al desvanecimiento de la señal. La modulación empleada es la misma para los datos y para control: QPSK o 16QAM. La **tasa de bajada** que se ofrece asciende hasta los 100 Mbps.

Por otro lado, para el enlace ascendente, se prefiere emplear **SC-FDMA** (Single Carrier FDMA) debido a que la potencia de transmisión es primordial en este caso. La modulación empleada en este enlace es QPSK o 16QAM para los datos, y BPSK o QPSK para control. La **tasa de subida** ofrecida es de 50 Mbps.

La arquitectura de estas redes LTE es totalmente nueva y se compone de los siguientes elementos:

1. **Evolved UTRAN (E-UTRAN)**. Es un conjunto de nodos o estaciones base llamados Evolved Node B (eNodeB) que además de estar conectados entre sí, están conectados con el núcleo de red. Sus principales funciones son comprimir las cabeceras IP, el cifrado de la información y dónde hacer la conexión con el núcleo de red. Desaparece el RNC que había en UMTS
2. **Evolved Core Network (Núcleo de red)**. Se encarga del enrutamiento de los paquetes de datos, de la autenticación de usuarios y de manejar las direcciones IP, entre otras funciones.

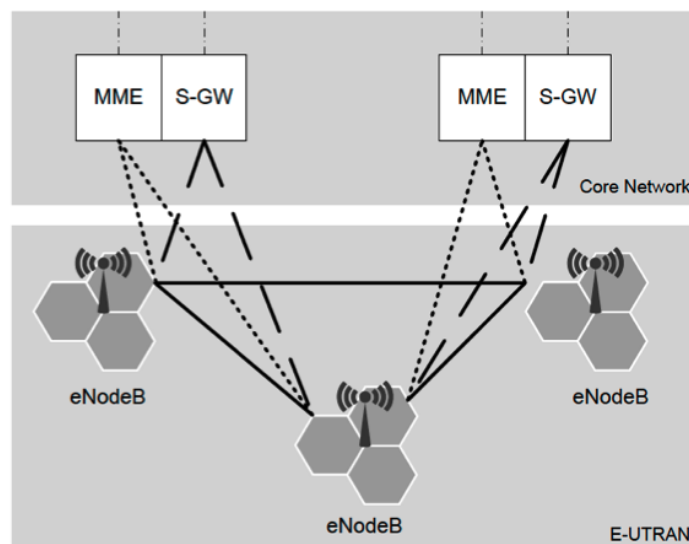


Figura 3-10: Esquema de la arquitectura de LTE [20]

A continuación se muestra la

Tabla 3-6 un resumen de las diferentes velocidades de los enlaces de subida y bajada para 3G y 4G:

Estándar	Velocidad enlace bajada	Velocidad enlace subida
UMTS	384 kbps	128 kbps
HSDPA	14 Mbps	5,7 Mbps
LTE	100 Mbps	50 Mbps

Tabla 3-6: Resumen de las características de estándares 3G y 4G

4 Software Defined Radio

4.1 Definición

¿Qué significa Software Defined Radio?

Traducido al español, Software Defined Radio (SDR) significa Radio definida por Software. El SDR Forum lo define como radio en la cual algunas o todas las funciones de la capa física están controladas por software [21].

Una radio es un sistema o dispositivo que transmite o recibe, de forma inalámbrica, señales de la parte de radiofrecuencia del espectro electromagnético para facilitar la transferencia de información; y radiofrecuencia (RF) es la porción del espectro electromagnético menos energético, y va aproximadamente desde los 3 Hz hasta los 300 GHz [22]

En otras palabras, SDR es un sistema de radiocomunicaciones en el que los componentes que habitualmente estaban implementados con hardware, ahora lo están mediante software en un ordenador o en un sistema embebido. Es decir, el objetivo principal es eliminar el hardware y acercar el software lo máximo posible a la antena.

En este Trabajo Fin de Grado se está sustituyendo el analizador vectorial de señales (hardware) por un sistema diseñado con el programa LabVIEW.

4.2 Ventajas y desventajas

Una de las desventajas de los sistemas basados en hardware es que solo pueden ser modificados mediante intervenciones físicas, dando lugar a un gasto de producción elevado y a una escasa flexibilidad a la hora de que varios protocolos o estándares convivan simultáneamente. Esto sucede porque los sistemas inalámbricos utilizan protocolos que varían de un servicio a otro e incluso de un país a otro y, lamentablemente, esto limita su desarrollo.

Sin embargo, la Radio definida por Software ofrece una solución a este problema. Su principal ventaja es que hace los sistemas de comunicaciones reconfigurables y sus actualizaciones y reparaciones se pueden hacer remotamente sin necesidad de hacer

ningún cambio físico. Esta versatilidad, además de permitir solucionar problemas más rápidamente, presenta la posibilidad de cambiar de modo, banda, función, modulación, protocolo, etc., solamente con seleccionar el programa adecuado en el ordenador.

Otra de las ventajas de SDR es que al tener menos componentes físicos existe menor probabilidad de fallo del sistema. Aparte, se elimina el problema de que dichos componentes se vuelvan obsoletos y haya que reemplazarlos por unidades más modernas, suponiendo un gran ahorro económico [23].

4.3 Aplicaciones

Actualmente, la tecnología SDR se utiliza en aplicaciones militares para disponer de sistemas de comunicaciones seguros y robustos, además de para detectar radares y amenazas. También es muy común que los aficionados hagan uso de Radio definida por Software para crear su propio receptor de radio AM/FM.

Se ha pensado utilizar SDR para futuras aplicaciones en diferentes terrenos [24]:

- Comunicaciones personales: para comunicaciones móviles y el uso de WiFi.
- Seguridad pública: para la fabricación de sensores.
- Difusión: televisión y radio digital

4.4 Tecnologías relacionadas

Cualquier sistema basado en Radio definida por Software debería evolucionar hacia una **radio cognitiva** (CR, del inglés Cognitive Radio), que es una radio en la que los sistemas de comunicación están al tanto de su estado interno y del entorno que les rodea, como la localización, la utilización del espectro, el comportamiento del usuario o el estado de la red. Su objetivo principal es compartir y aprovechar el espectro de frecuencias y para ello primero tiene que detectar qué frecuencias están siendo desaprovechadas. Una vez las ha detectado, ha de decidir cómo distribuir las mediante un mecanismo de control justo para todos los usuarios y dependiendo de la calidad de servicio que necesite cada uno. Con esos parámetros, el sistema es capaz de tomar decisiones para alcanzar sus objetivos o para mejorar su rendimiento [23].

No obstante, aparte de la radio cognitiva, hay más tecnologías hacia las cuales puede evolucionar un sistema basado en SDR

- Una **radio adaptable** es aquella en la que los sistemas de comunicación son capaces de controlar su rendimiento y pueden ajustar sus parámetros para mejorarlo.
- Una **radio inteligente** es una radio cognitiva que es capaz de aprender automáticamente, lo cual le permite mejorar su adaptación a los cambios de rendimiento y entorno.

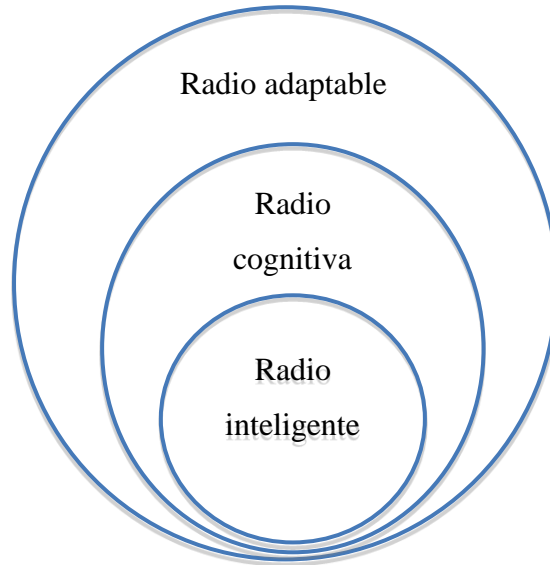


Figura 4-1: Diagrama que muestra la relación entre las diferentes tecnologías

4.5 USRP

Un sistema básico de SDR se puede componer de un ordenador personal con el software pertinente y un conversor analógico digital además de un adaptador de radiofrecuencia [25].

Para el desarrollo de un sistema se necesita un radio receptor o transmisor definido por software y una herramienta software que permita emular el hardware que se quiere sustituir.

Existe una larga lista de radios receptores o transmisores definidos por software y entre ellos se encuentra el USRP. Según National Instruments, la compañía que los diseña y comercializa, se puede crear sistemas de comunicación inalámbrica muy potentes utilizando el software LabVIEW, también de esta compañía, junto con los USRP y un ordenador [26].

El software que se usa normalmente con los USRP para crear sistemas basados en SDR es el GNU Radio. Sin embargo, hay otros elementos software que son compatibles con los USRP, como LabVIEW, ya mencionado antes, MATLAB o Simulink. Estos dispositivos tienen controladores de código abierto que soportan lenguajes de

programación tales como C++ o Python [27]. Gracias a esto, los usuarios también pueden desarrollar su propio software personalizado y utilizarlo con dichos controladores. Además, soportan las plataformas Linux, Windows y Mac y funcionan con diversos compiladores [28].

Como se puede desprender de todas estas características, los USRP son unos equipos muy accesibles, y aparte de eso pretenden ser una plataforma hardware económica para software radio. Por esto es muy frecuente su uso en universidades y laboratorios; incluso hay aficionados que adquieren uno de estos dispositivos.

5 Herramienta desarrollada

5.1 Descripción del analizador implementado

En el caso de que la entrada al AVS sea una señal digital, se presenta su constelación, su densidad espectral de potencia, los bits recibidos y una amplia variedad de opciones entre las que se puede elegir también la señal en crudo.

Para los ajustes de la demodulación digital, el programa permite escoger entre estándares predefinidos como GSM, EDGE, WCDMA, Bluetooth, WLAN, TETRA, etc.

En cuanto a la visualización de las gráficas, se puede elegir la frecuencia central para el caso de la densidad espectral de potencia, cambiar la escala de los ejes, sus unidades y emplear disparadores o marcadores a conveniencia del usuario.

En el caso de que la entrada sea una señal analógica, se presenta su densidad espectral de potencia, su función de densidad de probabilidad, y la señal en crudo, pudiendo elegir más opciones.

Mientras el analizador está recibiendo la señal, se puede pausar dicha recepción para así poder ver más detalladamente cualquiera de las gráficas. También se puede cambiar la disposición de estas, pudiendo escoger entre ver solo dos gráficas, cuatro, seis,...

El analizador implementado tiene muchas más características en las que no se ha profundizado por ser irrelevantes para la realización de este trabajo, y que por tanto no son mencionadas.

5.2 Equipo empleado

LabVIEW

LabVIEW es el acrónimo de Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench. Se trata de un software concebido para diseñar sistemas con el que se puede programar gráficamente mediante bloques [5].

Los programas diseñados con LabVIEW se llaman **instrumentos virtuales** (VI, del inglés, Virtual Instrument), y las funciones que se quiere que realicen se dibujan en el **diagrama de bloques**. Esto se hace mediante la colocación y unión de bloques que vienen prediseñados en el software. Cuando no hay ninguno que realice la función que se desea, se pueden crear bloques a partir del diseño de otro VI. La ejecución del programa y resultados se pueden observar en el **panel frontal**, que actúa como interfaz con el usuario.



Figura 5-1: Logotipo de LabVIEW [5]

NI USRP-2920

Un USRP (Universal Software Radio Peripheral) es un transceptor que soporta circuitos diseñados con el programa LabVIEW.

Estos instrumentos son diseñados y vendidos por la compañía americana National Instruments (NI).

En el modelo en concreto que se ha usado para este trabajo, el NI USRP-2920, la comunicación entre el USRP y el ordenador se hace a través de un puerto Gigabit Ethernet. Se ha utilizado como receptor conectándole una antena VERT2450. Puede operar en un rango de frecuencia de entre 50 MHz y 2.2 GHz y su máximo ancho de banda instantáneo es de 20 MHz [29].

El ancho de banda instantáneo es el rango de frecuencias contiguo más amplio en el cual un transmisor y un receptor pueden operar en cualquier momento [30].

La máxima tasa de muestreo a la que puede recibir este USRP es 50 MS/s.

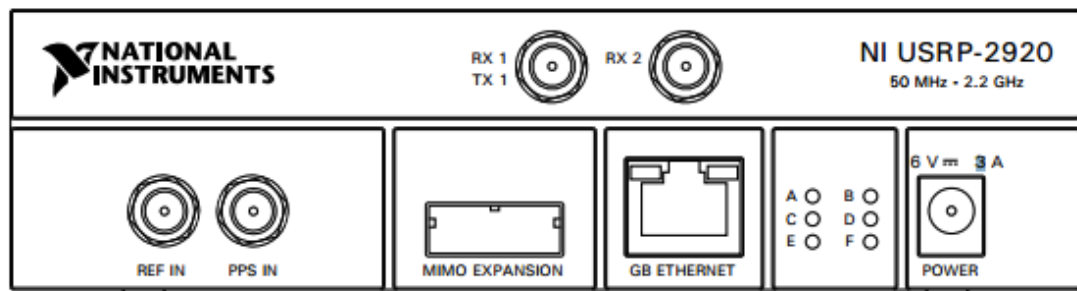


Figura 5-2: Panel frontal del NI USRP-2920 [31]



Figura 5-3: NI USRP-2920 [29]

Se observa en la parte superior del panel que hay dos entradas llamadas RX1/TX1 y RX2. Es en una de ellas donde se conecta la antena receptora.

En la parte inferior derecha del panel se encuentra la conexión para la fuente de alimentación, llamada “POWER”. Algo más a la izquierda se sitúa el puerto “GB ETHERNET” para conectar el USRP con el ordenador donde se utilizará LabVIEW.



Figura 5-4: Antena receptora VERT2450 [32]

Cada dispositivo USRP se identifica con una **dirección IP**. Una vez el USRP ya está conectado al ordenador, es necesario especificar su IP para poder usarlo con LabVIEW, pues existen otros escenarios en los que puede haber varios USRP u otros dispositivos.

Para averiguar la IP del USRP con el que se va a interactuar, hay que ir a Inicio y pulsar sobre “NI-USRP Configuration Utility”, tal y como se

muestra en la Figura 5-6. A continuación aparecerá una ventana en la que se listan todos los USRP conectados al ordenador donde se puede ver la IP de cada uno, como se ve en la Figura 5-7. Esta IP es la que hay que poner en la entrada “device names” que aparece en el panel frontal del programa de LabVIEW, y es necesaria para iniciar una sesión con USRP:

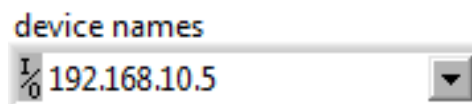


Figura 5-5: Entrada "device names" donde hay que especificar la IP del USRP

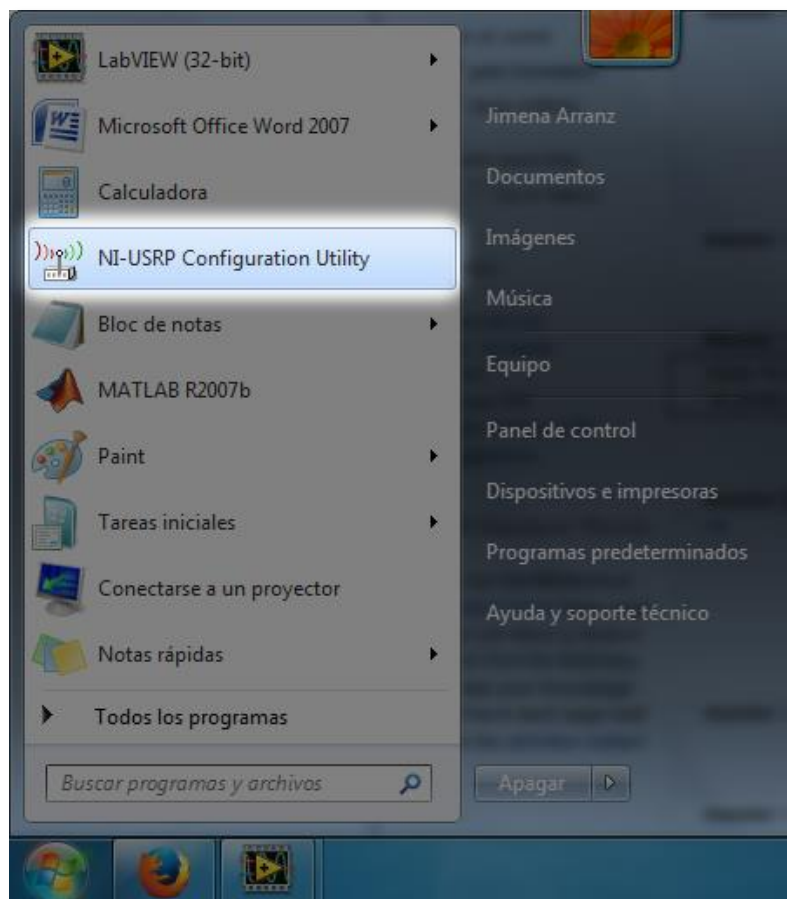


Figura 5-6: Cómo acceder a la IP de un USRP. Parte 1

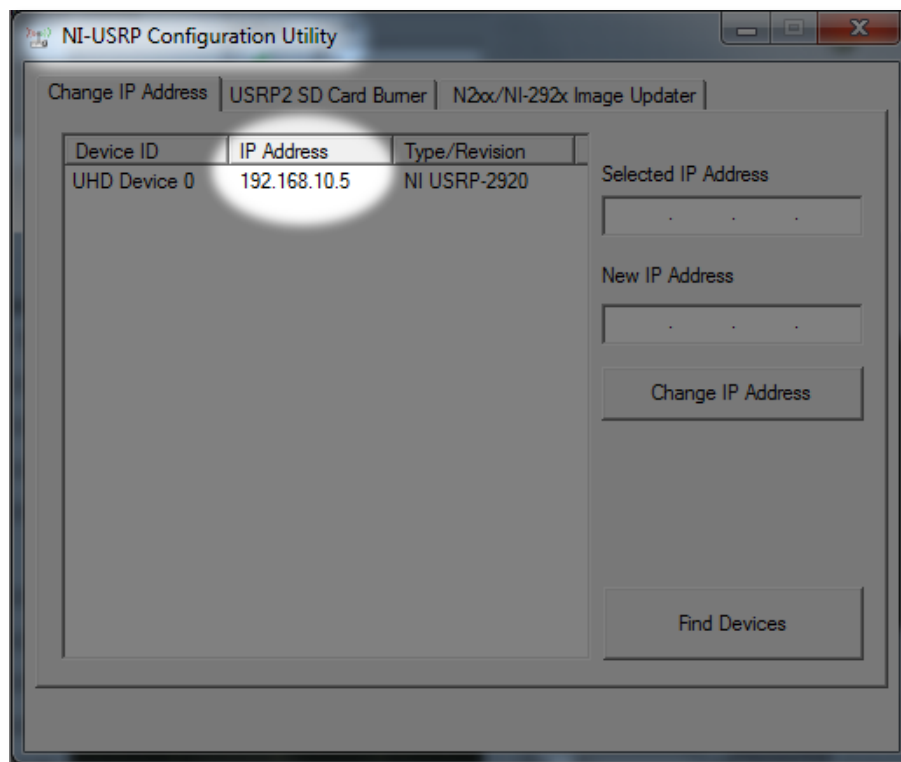


Figura 5-7: Cómo acceder a la IP de un USRP. Parte 2

Ordenadores

Se ha empleado un ordenador del Laboratorio equipado con el programa LabVIEW versión 2010. Gracias a él se han podido diseñar los diferentes instrumentos virtuales necesarios que posteriormente se han utilizado con el USRP.

Sus características esenciales son:

- Procesador Intel® Core™ i5-2500 CPU @ 3,30 GHz
- Memoria RAM de 4 GB
- Sistema operativo Windows 7 de 64 bits

Por otro lado, se ha empleado un segundo ordenador que tenía el software del Analizador Vectorial de Señales Agilent para observar el comportamiento esperado de la señal. Las características de dicho ordenador son las siguientes:

- Procesador Intel® Pentium® 4 CPU 2,40 GHz
- Memoria RAM de 494 MB
- Sistema operativo Windows XP Professional

Generador vectorial de señales Agilent E4438C

Este equipo es un Generador Vectorial de Señales y ha sido el transmisor de las señales GSM que recibía el USRP y que se han analizado a lo largo del trabajo.

Es diseñado y fabricado por la compañía americana Agilent Technologies, que se dedica a la fabricación de instrumentos de medida y evaluación.



Figura 5-8: Generador vectorial de señales Agilent E4438C [33]

Además de GSM, este instrumento presenta gran variedad de estándares predefinidos disponibles para generar señales de ese tipo, como EDGE, IS-95 CDMA o cdma2000. Si se prefiere, también se puede utilizar una modulación personalizada.

Según su hoja de características, las señales GSM que genera son de la siguiente forma [34]:

Esquema de codificación	Full Rate Speech TCH/FS
Datos	PN9 o PN15 La secuencia seleccionada es codificada continuamente a través de un bloque RLC como dice ETSI TS 100 909, 3GPP TS 05.03, V8.9.0, 2000-11
Estructura de la trama	Multitrama de 26 tramas como dice ETSI GSM, 05.01 versión 6.1.1 (1998-07)

Tabla 5-1: características de las señales GSM generadas con el generador Agilent

Donde TCH/FS representa un canal de tráfico a velocidad completa, es decir, que transporta información a 22,8 kbps.

PN9 o PN15 son secuencias generadas aleatoriamente a partir de una semilla (PN del inglés, Pseudorandom Noise) con las que se mezcla la señal recibida con el fin de corregir posibles errores en la transmisión.

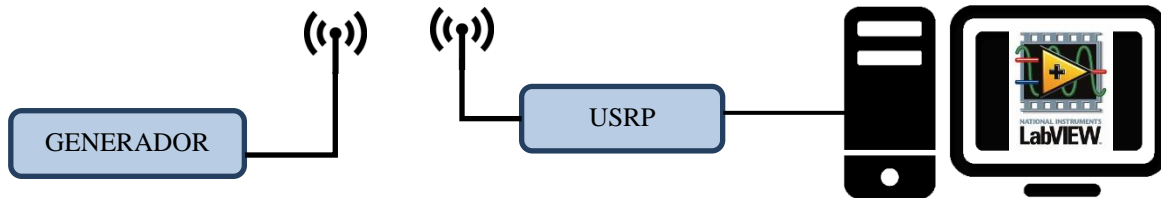


Figura 5-9: Esquema del entorno de trabajo

Este generador vectorial de señales es un dispositivo muy versátil ya que permite variar el estándar y por ejemplo, desactivar la codificación diferencial o la polaridad de los bits. También se puede a su vez modificar las tramas y patrones para hacer más fáciles las comprobaciones de LabVIEW.

En el panel frontal de este generador de señales hay una salida llamada “RF output” a la que se conecta un cable coaxial. Al otro extremo de este cable se conecta una antena transmisora. De esta forma, y configurando el generador de señales adecuadamente, la parte del sistema de la transmisión ya estaría dispuesta.

Analizador vectorial de señales 89600S

Este Analizador Vectorial de Señales es el objetivo principal del trabajo, es decir, el que se tiene que conseguir implementar con ayuda del USRP. Este equipo también es fabricado por Agilent Technologies y se ha concebido para ayudar a ingenieros a medir y evaluar señales moduladas de forma compleja.

Se ha utilizado para estudiar las funciones que ofrece y también ha servido como receptor para observar el resultado deseado en numerosas pruebas en las que no se sabía de antemano.

Para utilizarlo se requiere un ordenador en el que observar, en un programa que se instala automáticamente al configurar el analizador, las características de las señales recibidas. Es esto precisamente, lo que el usuario ve en el ordenador, lo que se pretende imitar en este trabajo.



Figura 5-10: Analizador vectorial de señales 89600S [35]

En el panel frontal del analizador hay una entrada llamada “Ch 1 Input” a la que se conecta un cable coaxial con una antena receptora en el otro extremo, o conectado a la entrada “RF Output” del generador en caso de que se quiera usar como transmisor. El analizador se conecta al ordenador mediante un puerto USB y así ya está preparada la disposición para ver el comportamiento de las señales recibidas por el AVS.

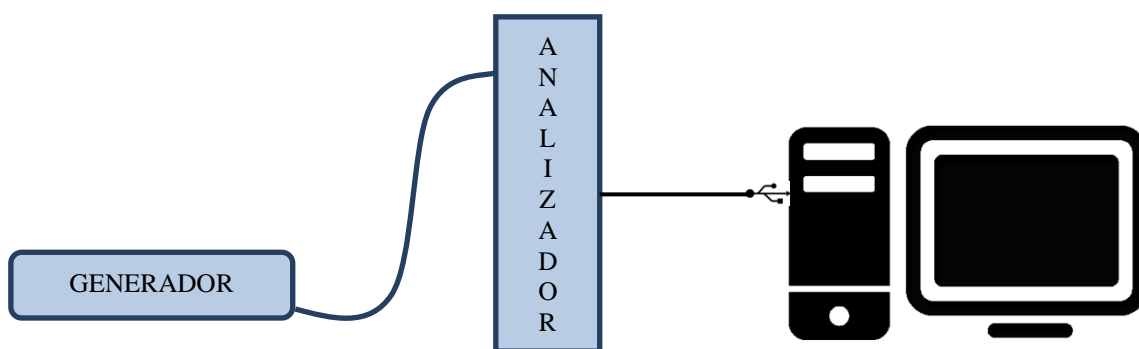


Figura 5-11: Esquema de ejemplo de utilización del analizador vectorial de señales

Tanto el generador como el analizador vectorial necesitan estar conectados a la electricidad.

5.3 Marco regulador

Marca CE

La marca CE de Conformidad Europea refleja si un producto cumple con los requisitos necesarios para poder ser comercializado en el Espacio Económico Europeo, es decir, en todos los países miembros de la Unión Europea y en los de la AELC (Asociación Europea de Libre Comercio: Islandia, Liechtenstein, Noruega y Suiza), así como en Turquía [36]. Este marcado simboliza la conformidad del producto con los requisitos esenciales de seguridad y salud que le son aplicables e impuestos al fabricante [37].



Figura 5-12: Marca CE [36]

El equipo del que se ha hecho uso para la realización del trabajo cumple con la conformidad CE.

Seguridad de equipos de laboratorio

El equipamiento que se ha empleado en el laboratorio sigue la norma europea **EN 61010-1**: *Requisitos de seguridad de equipos eléctricos de medida, control y uso en laboratorio. Parte 1: Requisitos generales* [38]. Dicha norma especifica los requisitos de seguridad para equipo electrónico que se pretende usar en procesos industriales o en el ámbito educacional y que puedan incluir dispositivos de los siguientes tipos [39]:

- Equipo de medidas y de pruebas eléctricas
- Equipo de control eléctrico
- Equipo de laboratorio eléctrico
- Accesorios que se planean usar con los equipos arriba mencionados

Compatibilidad electromagnética

Los aparatos eléctricos y electrónicos suelen sufrir efectos de acoplamiento cuando están siendo usados unos cerca de otros. La compatibilidad electromagnética se

encarga de su eliminación o reducción a través de la recomendación de normas y regulaciones. Esta rama de la electrónica y las telecomunicaciones designa las técnicas y tecnologías existentes para reducir esas molestias y mejorar la inmunidad de los aparatos [40].

Todo el equipo electrónico que se ha empleado en el laboratorio sigue las siguientes normas europeas:

- **EN 61326-1:** *Material eléctrico para medida, control y uso en laboratorio. Requisitos de compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 1: Requisitos generales* [41].
- **EN 55011:** *Equipos industriales, científicos y médicos. Características de las perturbaciones radioeléctricas. Límites y métodos de medición* [42].
Estos requisitos también se centran en electrodomésticos y otros dispositivos que generen o usen energía de radiofrecuencia [43].

La herramienta diseñada, puesto que utiliza equipos comerciales que cumplen con las normativas, también las cumple.

5.4 Pruebas y validación

Demodulación

LabVIEW cuenta con un bloque para realizar demodulación MSK. GSM utiliza la modulación GMSK y esta es simplemente la MSK con un filtro gaussiano.

Por lo tanto, para realizar el demodulador, se tomó como referencia dicho bloque de LabVIEW haciendo varios cambios, que son especificados en el anexo A donde se pueden ver los diagramas de bloques.

Para comprobar su correcto funcionamiento, se configuró el generador de señales con patrones fáciles como 4 1's y 4 0's, u 8 1's y 8 0's. Aunque el bloque MSK incorpora un decodificador diferencial, en la transmisión desde el generador se desactivó al principio la codificación para estar seguros de que la implementación de dicho decodificador no interfiriese en los resultados obtenidos. Conectando el generador

al analizador vectorial de señales, se podía saber de antemano cuáles tenían que ser los resultados.

En un primer momento, se recibían aparentemente bien los bits a la salida del demodulador. Entonces se procedió a usar el decodificador del bloque MSK integrado en LabVIEW. Fue en aquel momento cuando se vio que los bits a la salida de este no eran como se esperaba. Por tanto, se procedió a la implementación de un propio decodificador diferencial, por si el error pudiese estar ahí, pues hay que tener en cuenta que no es exactamente lo mismo MSK que GMSK.

No había duda de que el decodificador implementado era correcto. Sin embargo los bits a su salida seguían siendo erróneos. En este momento se dio marcha atrás para verificar que el demodulador funcionaba al 100%.

Se pudo observar que no se habían hecho las pruebas suficientes, sino solamente con patrones de 1's y 0's. Al generar tramas normales o patrones no tan aleatorios (110111011101 o 001000100010, por ejemplo), no se recibían los bits deseados.

Resultó que la razón por la que no se obtenían los resultados deseados era que la **tasa de muestreo** no era correcta

$$\text{Número de muestras por símbolo} = \frac{\text{Tasa de muestreo}}{\text{Tasa de símbolos}}$$

La **tasa de símbolos** en GSM es de 270,833 kbps. Como estamos tratando con señales binarias, esta tasa coincide con la de bits que ya fue mencionada y calculada en el apartado de GSM.

$$\text{Tasa de muestreo} = \text{Número} \frac{\text{muestras}}{\text{símbolo}} \times 270,833 \text{ ksímbolos/segundo}$$

Nº muestras por símbolo	Tasa de muestreo [muestras/s]
2	$541,666 \cdot 10^3$
4	$1,0833 \cdot 10^6$
8	$2,1666 \cdot 10^6$
16	$4,3333 \cdot 10^6$

Tabla 5-2: Tasas de muestreo correspondientes a los números de muestras por símbolo

Se hicieron pruebas cambiando el número de muestras por símbolo a la entrada del demodulador con respecto al correspondiente a la tasa de muestro utilizada, por si el fallo estuviera en las muestras que necesitaba el demodulador. Los resultados se muestran en la Tabla 5-3.

Patrón transmitido	Patrón recibido	Tasa de muestreo [muestras/s]	Nº muestras/símbolo (Tasa de muestras)	Nº muestras/símbolo (Entrada demod)
4 1's y 4 0's	11111111...	541,666 k	2	2
	11111111...			4
	11111111...			8
	00000000...	1,0833 M	4	2
	4 1's y 4 0's			4
	2 1's y 2 0's			8
	10101010...			16
	16 1's y 16 0's	2,1666 M	8	2
	8 1's y 8 0's			4
	4 1's y 10's			8
	2 1's y 2 0's			16
	10101010...			32
	32 1's y 32 0's	4,3333 M	16	2
	16 1's y 16 0's			4
	8 1's y 8 0's			8
	4 1's y 4 0's			16
	2 1's y 2 0's			32

Tabla 5-3: Resultados de las pruebas cambiando el nº de muestras por símbolo a la entrada del demodulador

En negrita se destacan las situaciones en las que el patrón transmitido coincide con el recibido. Tras la realización de estas pruebas vimos que el demodulador no necesitaba número de muestras por símbolo diferente al correspondiente a la tasa de muestreo. Pero que se usase el mismo número de muestras por símbolo tampoco era un parámetro decisivo para recibir correctamente, pues usando la tasa de muestreo de $541,666 \cdot 10^3$ muestras/s no se recibía el mismo patrón que se había transmitido.

Por lo tanto, se continuó con el estudio, esta vez manteniendo el mismo número de muestras por símbolo, pero variando el patrón para las diferentes tasas de muestreo, y así averiguar cuál de ellas es con la que se obtienen los resultados deseados.

Los resultados de dichas pruebas se muestran en la

Tabla 5-4. En ella, las filas en negrita son aquellas en las que el patrón transmitido y el recibido coinciden.

Como se puede observar en dicha tabla, cuando se usa la menor tasa de muestreo solo se reciben bien los patrones que no cambian en una longitud de 8 bits o más. Para poder recibir bien los patrones cuyos bits son diferentes cada vez, es necesario utilizar una **tasa de muestreo de $4,3333 \cdot 10^6$ muestras/s.**

Tasa de muestreo [muestras/s]	Patrón transmitido	Patrón recibido
541,666 k	10101010	Aleatorio
	2 1's y 2 0's	Aleatorio
	4 1's y 4 0's	Aleatorio
	8 1's y 8 0's	8 1's y 8 0's
	16 1's y 16 0's	16 1's y 16 0's
	32 1's y 32 0's	32 1's y 32 0's
	64 1's y 64 0's	64 1's y 64 0's
1,0833 M	10101010	Aleatorio
	2 1's y 2 0's	10000000...
	4 1's y 4 0's	4 1's y 4 0's
	8 1's y 8 0's	8 1's y 8 0's
	16 1's y 16 0's	16 1's y 16 0's
	32 1's y 32 0's	32 1's y 32 0's
	64 1's y 64 0's	64 1's y 64 0's
2,1666 M	10101010	10000000...
	2 1's y 2 0's	2 1's y 2 0's
	4 1's y 4 0's	4 1's y 4 0's
	8 1's y 8 0's	8 1's y 8 0's
	16 1's y 16 0's	16 1's y 16 0's
	32 1's y 32 0's	32 1's y 32 0's
	64 1's y 64 0's	64 1's y 64 0's
4,3333 M	10101010	10101010
	2 1's y 2 0's	2 1's y 2 0's
	4 1's y 4 0's	4 1's y 4 0's
	8 1's y 8 0's	8 1's y 8 0's
	16 1's y 16 0's	16 1's y 16 0's
	32 1's y 32 0's	32 1's y 32 0's
	64 1's y 64 0's	64 1's y 64 0's

Tabla 5-4: Resultados variando el patrón para cada tasa de muestreo

Decodificación

A pesar de que el bloque predefinido para la demodulación MSK ya traía un decodificador diferencial, se decidió hacer uno nuevo. Esta decisión fue fruto de las primeras pruebas en las que, tras utilizar el decodificador predefinido, no se recibía el resultado esperado. Se procedió a su implementación y aun así se recibían datos erróneos.

Tras más pruebas con el demodulador finalmente se observó que el problema estaba ahí y no en el decodificador, como se ha explicado en la sección anterior. Sin embargo, puesto que el trabajo ya estaba hecho, se hace uso de él y no del que viene predefinido en LabVIEW.

El esquema del decodificador diferencial que se ha implementado es el siguiente:

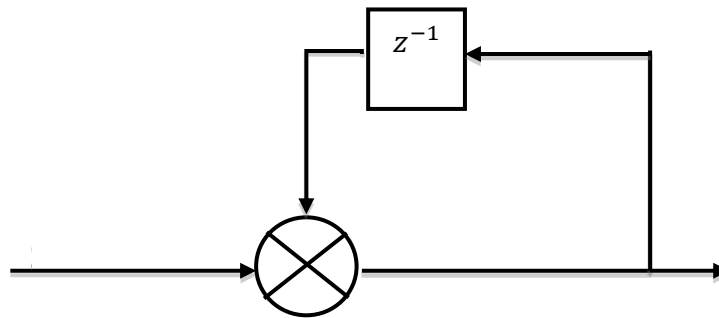


Figura 5-13: Esquema del decodificador

Que corresponde con la operación ya expuesta:

$$x_i = y_i \text{ XOR } x_{i-1}$$

Este decodificador fue probado independientemente, poniéndole en la entrada sucesiones de bits aleatorias y su funcionamiento era óptimo.

Sin embargo, el resultado de las primeras pruebas era siempre erróneo, hasta que probando a cambiar el estándar se dio con la solución. Lo que se hizo fue **invertir la polaridad de los bits** en el generador. Con esta simple opción, los bits recibidos a la salida del decodificador eran los correctos.

Evidentemente, una señal GSM recibida del aire no va a tener por defecto los bits invertidos, así que se tenía que manejar esta opción desde el receptor. Por esta razón, se ha incorporado una nueva entrada al bloque de demodulación llamada “Inversion Bits”. A ojos del usuario está desactivada predeterminadamente, pero internamente se hace la inversión necesaria para obtener el resultado deseado, como se puede ver en la Figura 5-14. Si el usuario quisiera probar a ver qué salida se obtiene invirtiendo la polaridad de los bits, solamente tiene que activar esta entrada y automáticamente se deshará la inversión.

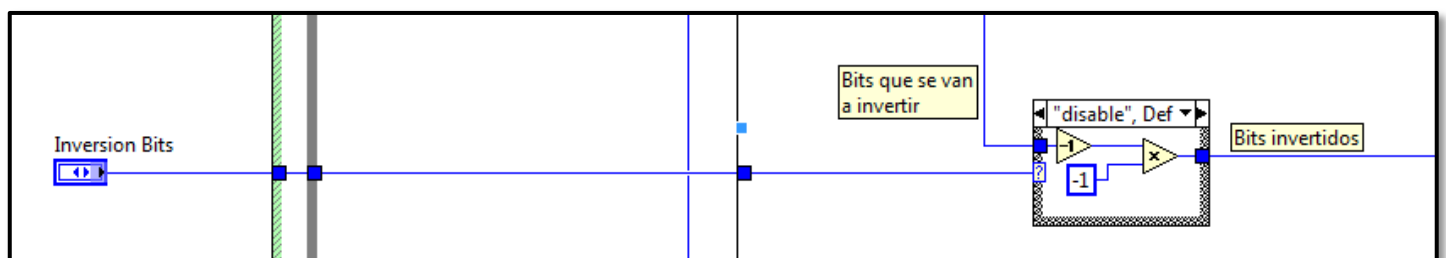


Figura 5-14: Entrada "Inversion Bits" añadida

El diseño del decodificador en LabVIEW se muestra en la Figura 5-15:

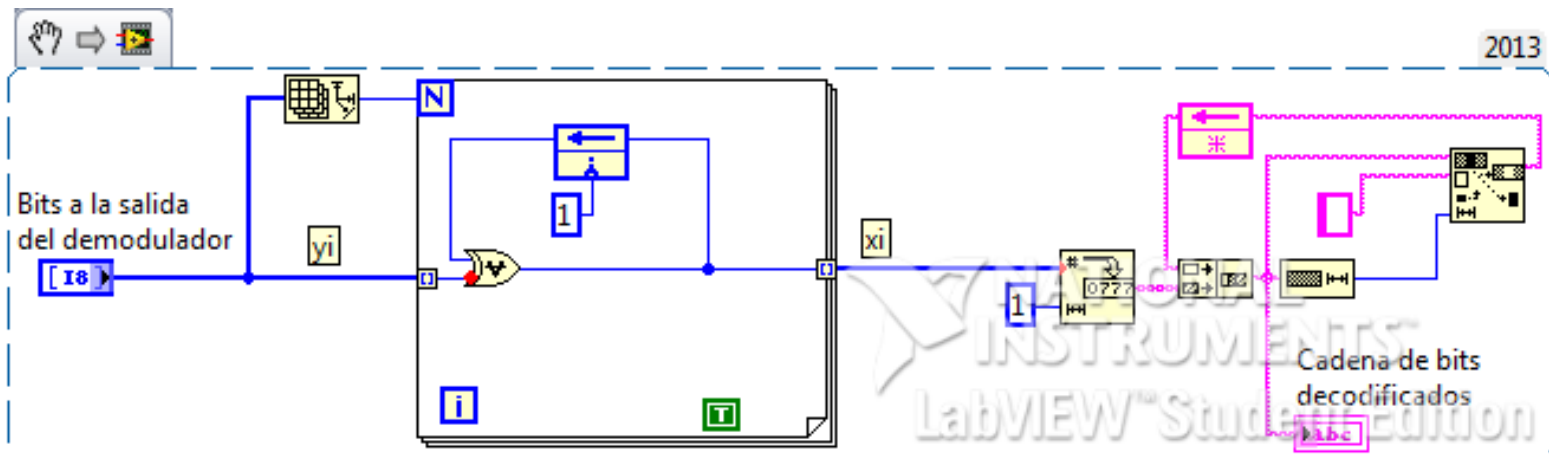


Figura 5-15: Implementación del decodificador

También se ha mejorado la presentación de los bits decodificados. En vez de mostrarlos en un array de bits tal y como saldrían del bucle, que es la caja que hay en la Figura 5-15, se han pasado a un cuadro en el que aparecen como cadena de caracteres. Es mucho más fácil de distinguir los patrones y no hay que preocuparse por el índice de los arrays.

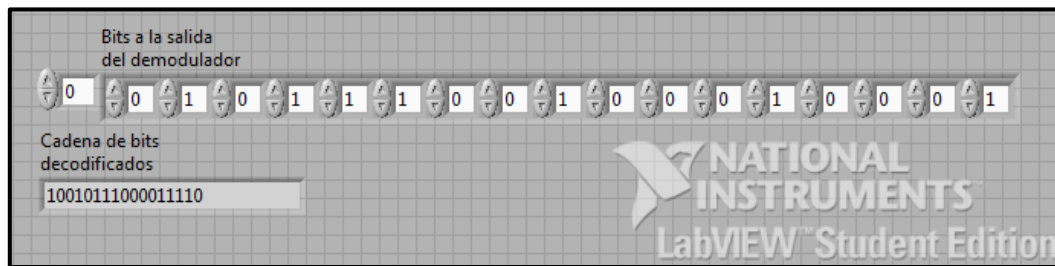


Figura 5-16: Ejemplo de cómo se ven los bits a la salida del decodificador

Constelación

Una constelación es la representación en el plano complejo de una señal que ha sido modulada digitalmente. Los puntos que se muestran en dicho plano realmente representan los estados de símbolo en los esquemas de modulación digital.

Los símbolos tienen componentes real y compleja, que son su amplitud y fase respectivamente. La primera se representa sobre el eje x o “I”, y la segunda, sobre el eje y o “Q” [44].

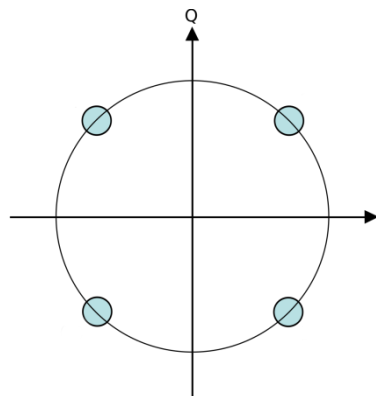


Figura 5-17: Diagrama de constelación GSMK

Para conseguir dichas componentes a partir de la señal recibida por el USRP, se ha hecho uso de un bloque de LabVIEW que separa las componentes real e imaginaria de cada muestra de la señal. Este bloque se llama “*MT IQ to XY Graph*”.

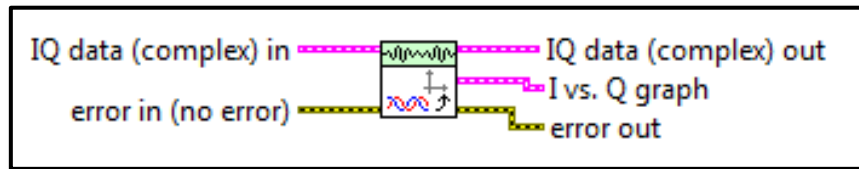


Figura 5-18: Instrumento virtual para la representación de la constelación

A continuación, la salida “*I vs. Q graph*” se representa en una gráfica y el resultado es la constelación deseada.

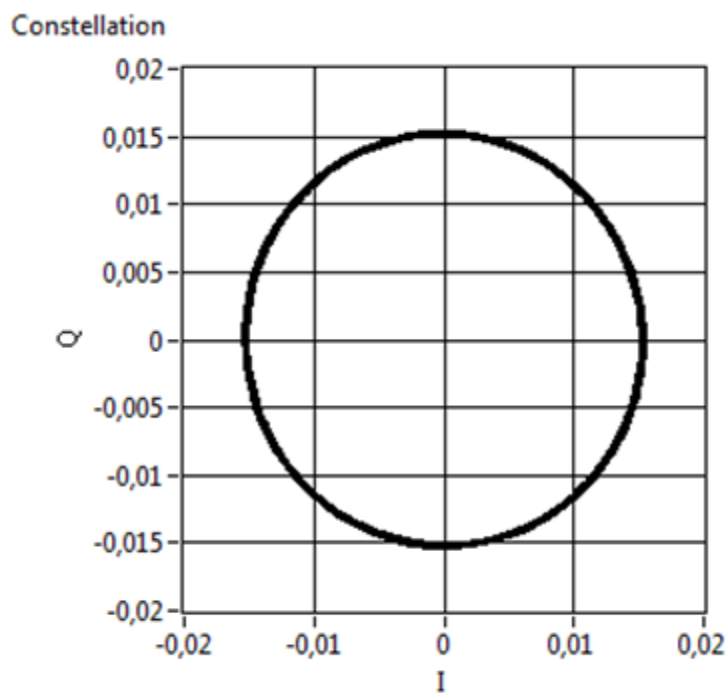


Figura 5-19: Constelación obtenida para el patrón 4 1's y 4 0's

En ocasiones aparecen unas líneas que atraviesan la circunferencia que se deben a la transición que hay entre los símbolos.

Densidad espectral de potencia

Para obtener la densidad espectral de potencia de la señal recibida se ha utilizado un instrumento virtual que tiene LabVIEW.

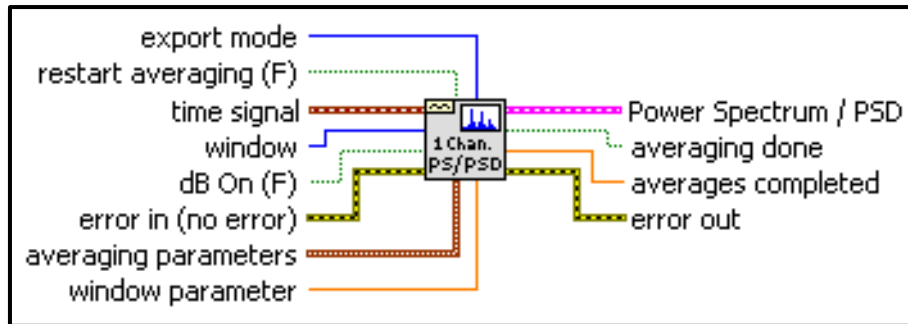


Figura 5-20: Instrumento virtual que halla la densidad espectral de potencia

De esta forma, solamente con unir la señal recibida a la entrada “time signal” ya la obtenemos en la salida “Power Spectrum / PSD”

La entrada del bloque llamada “dB On” sirve para determinar si se desea que los resultados sean expresados en decibelios o no. Por defecto es falso (F) .

Al principio se decidió poner una constante booleana con el valor True (T) para ver la gráfica siempre en decibelios a pesar de que en el analizador original se muestra en dBm.

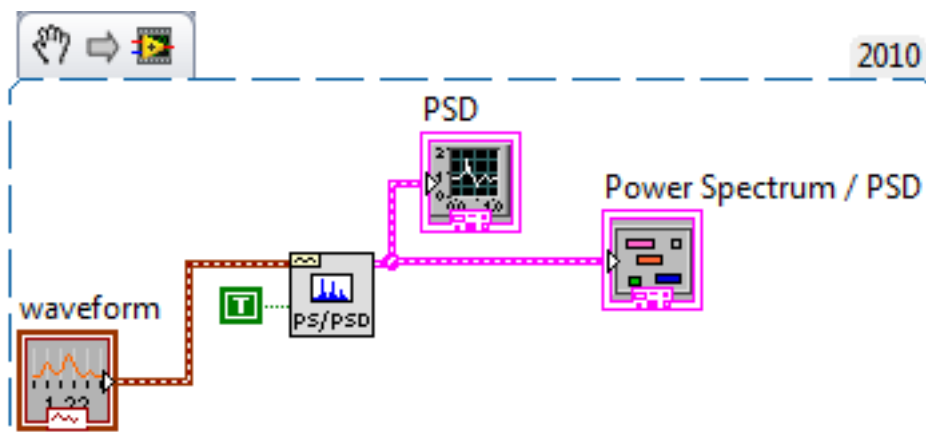


Figura 5-21: Implementación para calcular la densidad espectral de potencia

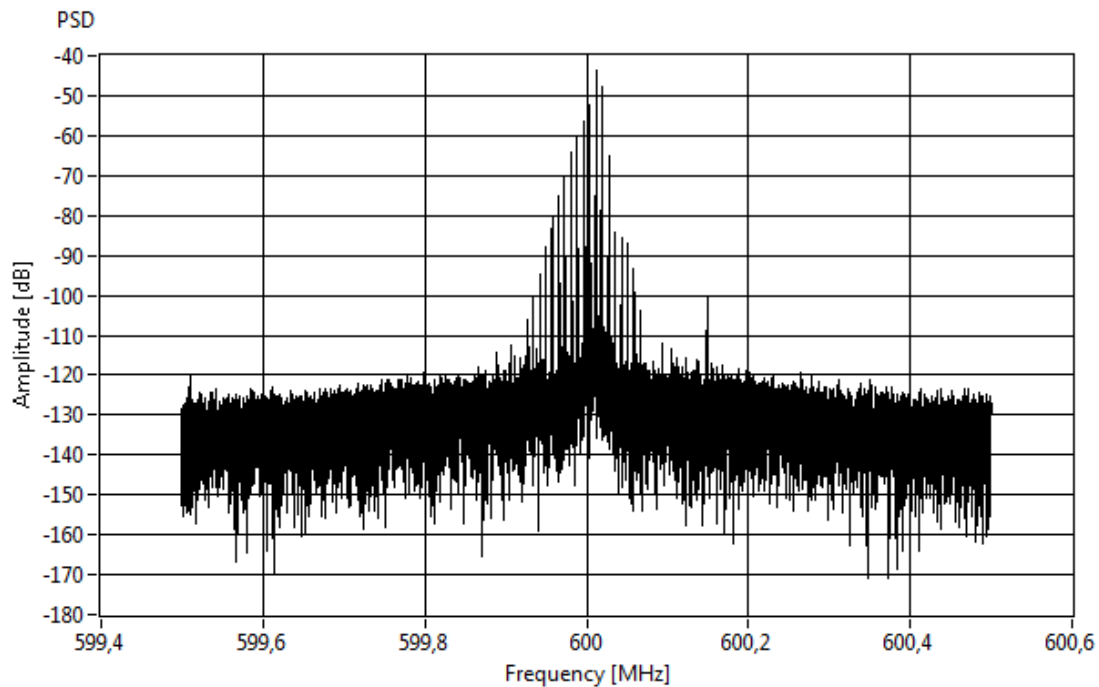


Figura 5-22: Densidad espectral de potencia para el patrón 8 1's y 8 0's

Sin embargo, más adelante se mejoró la visualización de esta gráfica en cuanto a las unidades y se añadió la posibilidad de ver la densidad espectral de potencia en dBW, en vatios o en dBm.

Para ello se cambió la constante booleana que se había creado para la entrada “dB On” y se creó un control “dBW/W” que si es verdadero (T) muestra los valores en dBW y si es falso (F) los muestra en vatios. Además se creó otro control por si se deseara ver los valores en dBm. Si este último está activado (T) se muestran los valores en dBm. De no ser así, se muestran en cualquiera de las otras dos unidades.



Figura 5-23: Controles para cambiar las unidades de la gráfica PSD

Además, también se incluyó un control de frecuencia central para, en caso de cambiarla, se cambie automáticamente en la gráfica.

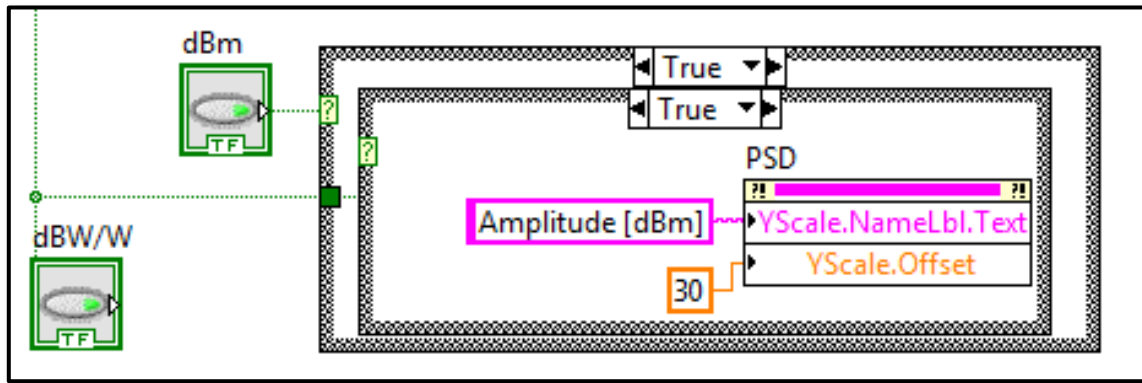


Figura 5-24: Diagrama de bloques para pasar a dBm

Potencia comprendida entre dos marcadores

Se ha habilitado la opción de generar dos marcadores en la gráfica de la densidad espectral de potencia para mostrar la potencia comprendida entre ellos. Se ha diseñado un botón llamado “Create Cursor”, que al pulsarlo crea los dos marcadores en la gráfica. Estos aparecen en el mismo punto, pero pueden moverse con el ratón a donde se desee.

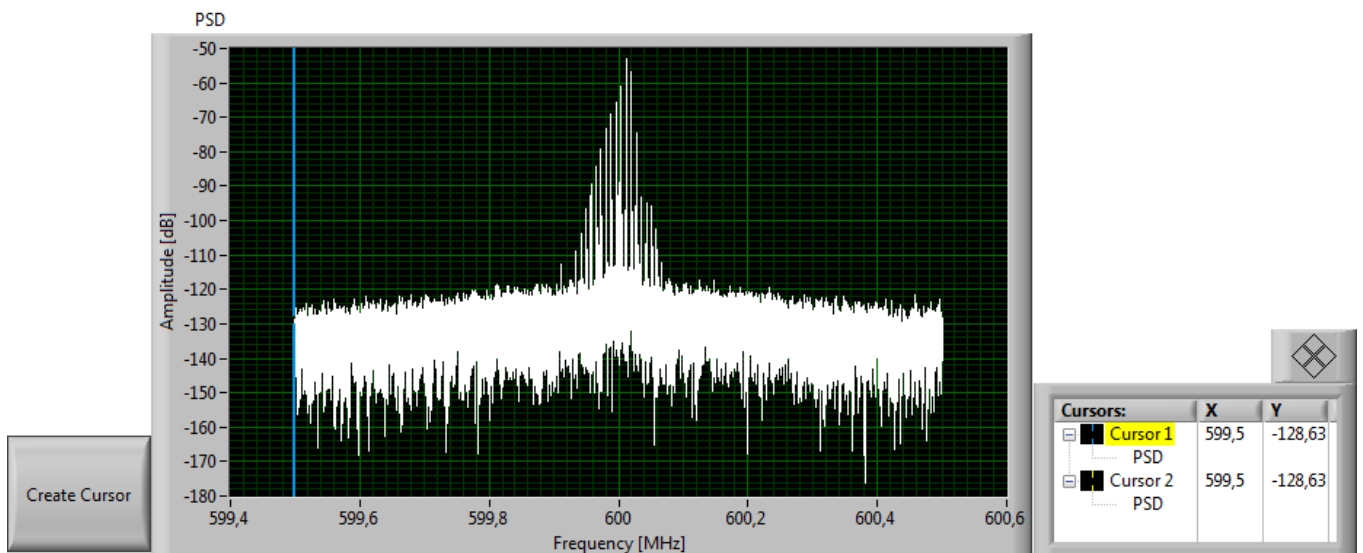


Figura 5-25: Marcadores en la misma posición, según se pulsa el botón

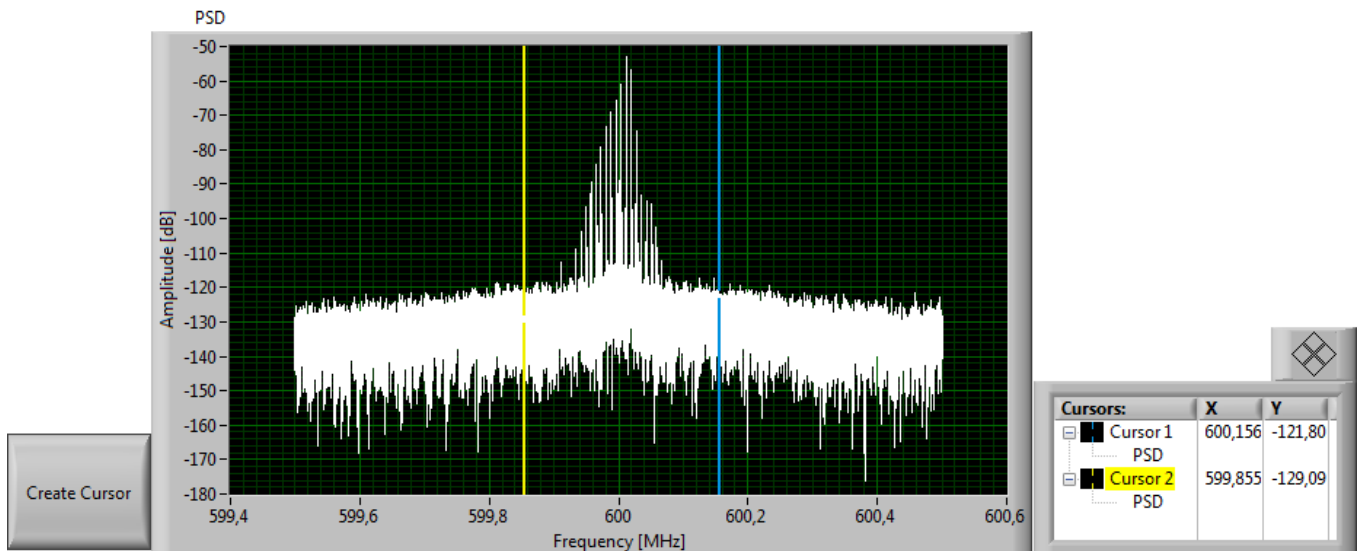


Figura 5-26: Posición de los marcadores una vez se han colocado donde se desea

Cabe destacar que el hecho de observar la posición de más de un marcador en una misma gráfica representa una ventaja con respecto al analizador original, pues solo permite ver un marcador en cada gráfica, y en el caso de la potencia comprendida entre dos marcadores, no muestra sus posiciones sino solamente dicha potencia.

Para llevar a cabo esta tarea, se ha tenido que hacer la FFT de la señal recibida, y a continuación se colocó bien el eje de coordenadas.

Para comprobar que este proceso se había llevado bien a cabo, se probó la parte de la FFT independientemente simulando una señal sinusoidal con el instrumento virtual de LabVIEW llamado “*Simulate Signal*”. Al ponerlo en el diagrama de bloques aparece una ventana en la que se puede configurar la frecuencia de la señal, la frecuencia de muestreo y el número de muestras.

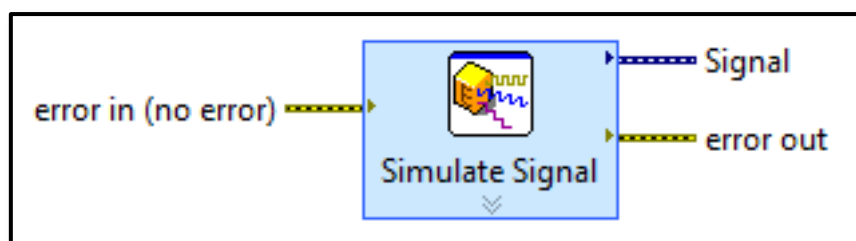


Figura 5-27: Instrumento virtual que permite simular señales

En este caso se ha configurado la señal con una frecuencia de 245 kHz, frecuencia de muestreo de 10 MHz y número de muestras, 10000000.

El diagrama de bloques correspondiente para la prueba queda de esta manera:

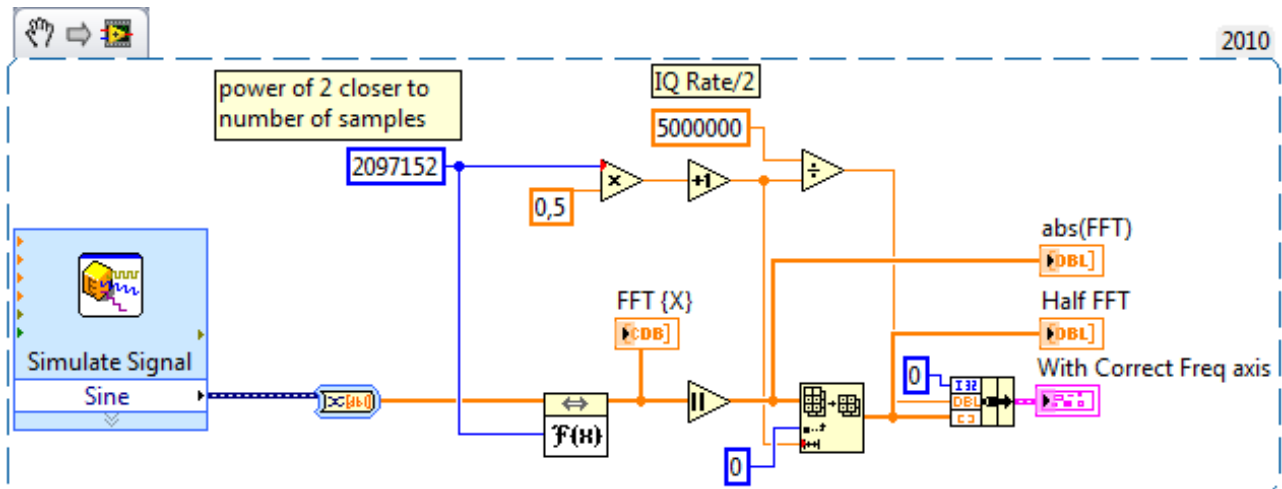


Figura 5-28: Diagrama de bloques para las pruebas de FFT

Y el resultado obtenido en la gráfica “With Correct Freq axis”:

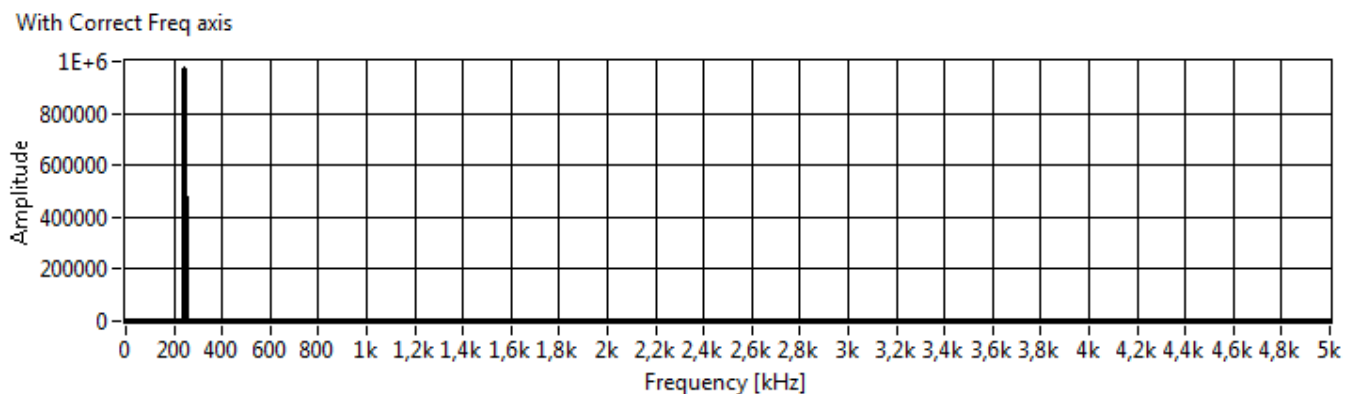


Figura 5-29: FFT de la señal sinusoidal con el eje x colocado

Como se puede observar, se obtiene un pulso en la frecuencia central, 245 kHz, que es suficiente para saber que el diagrama de bloques es correcto.

Una vez añadido esto al programa principal, se tuvo que escalar también el eje Y porque para obtener la magnitud real de cada frecuencia hay que dividir su valor entre el número total de muestras. También se colocó la componente DC (la frecuencia central) en el centro de la gráfica, gracias a la opción “FFT shift”. El resultado se puede observar en la Figura 5-30.

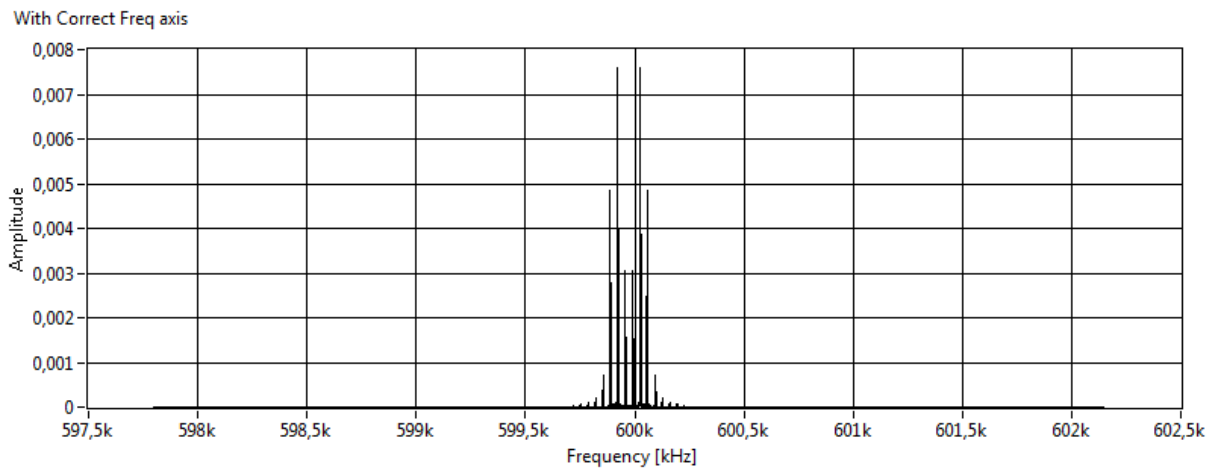


Figura 5-30: FFT de la señal GSM recibida

Además, está el inconveniente de que el USRP convierte todo lo que recibe a banda base, así que en los resultados obtenidos no se tenía en cuenta la potencia de la portadora. Para calcularla se hicieron varias pruebas con los dos analizadores y se calibró el sistema de forma experimental con una potencia de **-68 dBm**. Se tuvo en cuenta este valor para el resultado final.

Para calcular la potencia entre los dos marcadores, se siguió el siguiente procedimiento:

- Se halló el valor absoluto del vector de la FFT y se elevó al cuadrado
- Se calcularon los índices de los marcadores correspondientes al vector de la FFT. Para ello se tuvo en cuenta el incremento de frecuencia que hay entre cada muestra y la frecuencia inicial de la FFT. Dicho incremento se calcula dividiendo la tasa de muestreo entre el número total de muestras. Así, el índice de cualquier marcador viene dado por:

$$\text{Índice} = \frac{\text{Posición X del marcador} - \text{frecuencia inicial de FFT}}{\text{incremento de frecuencia de FFT}}$$

- Se sumaron todos los valores entre dichos índices y se cambió de unidades, teniendo en cuenta los -68 dBm mencionados anteriormente, para poder ver el resultado en dBm.

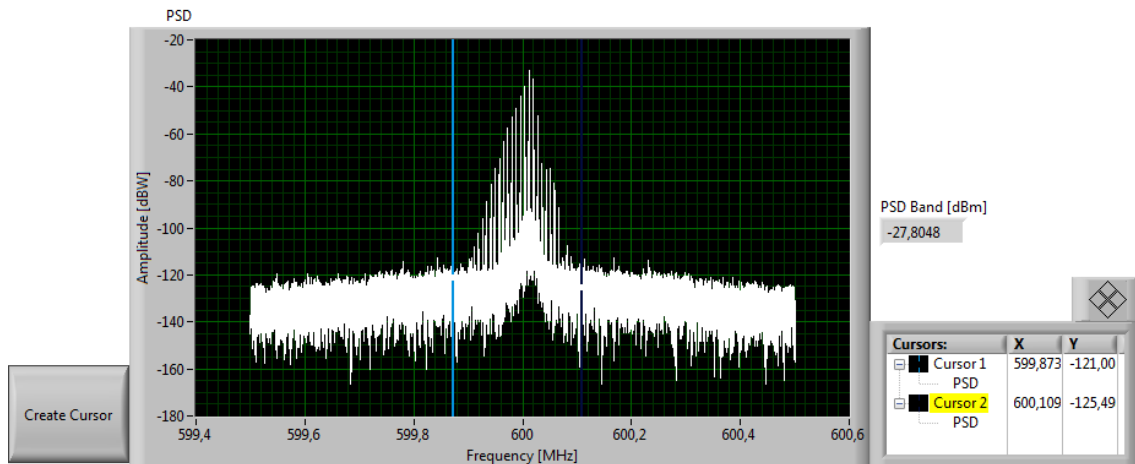


Figura 5-31: PSD con la potencia comprendida entre dos marcadores

Disparador

Se ha intentado habilitar un disparador pero no se ha conseguido que realice la función al 100% sino que es una versión muy básica. Lo que realiza este disparador simplemente es parar la señal “Raw Main Time” en el momento en que supera el valor especificado por “Trigger”, y en cuanto vuelva a estar por debajo de ese umbral, se vuelve a mostrar la señal en tiempo real.

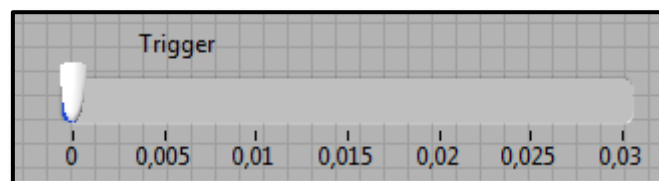


Figura 5-32: Disparador

6 Entorno socioeconómico y presupuesto

La realización de este Trabajo Fin de Grado tiene un gran fin para con la sociedad, pues está orientado a la docencia. Además, la sustitución de un equipo físico por un sistema diseñado con software hace que tenga importancia en la economía de la universidad. Como el equipo ya está adquirido, no supone un ahorro económico directo, pero sí mejora la situación del problema de solo contar con un AVS, pues se evita la necesidad de invertir dinero en más unidades.

En este apartado también se va a hacer un cálculo del coste derivado de la realización de este Trabajo Fin de Grado. Se hace para un periodo de **seis meses**, a pesar de que la duración total sea de siete. Esto es porque se tienen en cuenta los días que la universidad estaba cerrada durante los meses de abril y agosto, y los días que no se acudió al Laboratorio por circunstancias personales.

6.1 Coste de material

Para realizar el cálculo del presupuesto material se tiene en cuenta la depreciación de los equipos materiales que se han utilizado. Para calcular la amortización se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Amortización} = \frac{\text{Coste del activo}}{\text{Años de vida útil}} \times \text{período que se ha usado el activo}$$

Según las tablas de amortización de la Agencia Tributaria, los equipos para tratamiento de la información y sistemas y programas informáticos tienen un período máximo de vida de **10 años**.

El período que se han usado los equipos para la realización de este trabajo es de 6 meses, es decir, **0,5 años**. Sin embargo también se tiene en cuenta que no eran nuevos de fábrica, sino que cada uno tenía ya cierto tiempo de uso.

Además, se considera que el uso que se le ha dado a cada instrumento a lo largo del proyecto es del 100%.

Se debe tener en cuenta que los precios son **orientativos**, pudiéndose ver modificados en función del lugar de compra y del número de unidades adquiridas.

Concepto	Precio unidad	Unidades	Total atribuible
NI USRP-2920	2430 €	1	121,50 €
Antena vertical VERT 2450	80 €	2	8 €
Cable coaxial 2 m	2 €	2	0,20 €
Ordenador (LabVIEW)	600 €	1	30 €
Ordenador (Analizador)	500 €	1	25 €
Generador vectorial de señales Agilent E4438C	12500 €	1	625 €
Analizador vectorial de señales Agilent 89600S	250000 €	1	2500 €
Total coste de material			3309,70 €

Tabla 6-1: Coste de material

6.2 Coste de software

Concepto	Precio unidad	Total atribuible
Licencia LabVIEW para universidades	8000 €	200 €
NI Modulation Toolkit para LabVIEW	1930 €	72,40 €
Total coste de software		272,40 €

Tabla 6-2: Coste de software

6.3 Coste de personal

Para la estimación del coste de personal se considera que se ha trabajado una media de 4 horas al día. Al tutor se le atribuye un 10% de las horas trabajadas del alumno.

Cargo	Precio por hora	Nº de horas al mes	Cantidad de meses	Total
Graduada en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación	35 €	84	6	17640 €
Doctor Ingeniero de Telecomunicación	60 €	8,4	6	3024 €
Total coste de personal				20664 €

Tabla 6-3: Coste de personal

6.4 Coste global

A los costes de material, de software y de personal se les añade un coste adicional como concepto de coste indirecto, que es el 20% de la suma de los anteriores.

Concepto	Cuantía
Coste de material	3309,70 €
Coste de software	272,40 €
Coste de personal	20664 €
Costes indirectos	4849,22 €
TOTAL	29095,32 €

Tabla 6-4: Coste global del Trabajo Fin de Grado

El presupuesto total para la realización de este Trabajo Fin de Grado es de **veintinueve mil noventa y cinco euros con treinta y dos céntimos (29095,32 €)**

7 Conclusiones y mejoras

7.1 Conclusiones del trabajo

La finalidad de este Trabajo Fin de Grado era la implementación de un Analizador Vectorial para señales GSM mediante equipo Software Defined Radio.

Se han podido implementar las características más importantes de una señal y se ha comprobado su validez mediante diferentes pruebas ya expuestas en su correspondiente sección.

Lo óptimo habría sido poder captar señales GSM reales de una estación base próxima al laboratorio, o donde quiera que esté el receptor USRP. De hecho, se hicieron pruebas probando con frecuencias de entre 945 y 946 MHz, entre las que en 945,9 MHz se recibía una constelación y se distinguían los ocho canales en la señal en tiempo real, como se muestra en la Figura 7-1 y en la Figura 7-2:

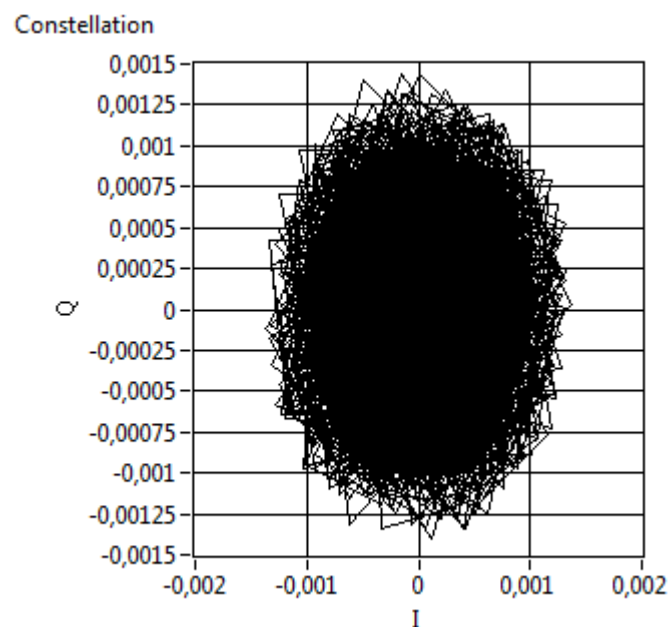


Figura 7-1: Constelación obtenida en la frecuencia central 945,9 MHz

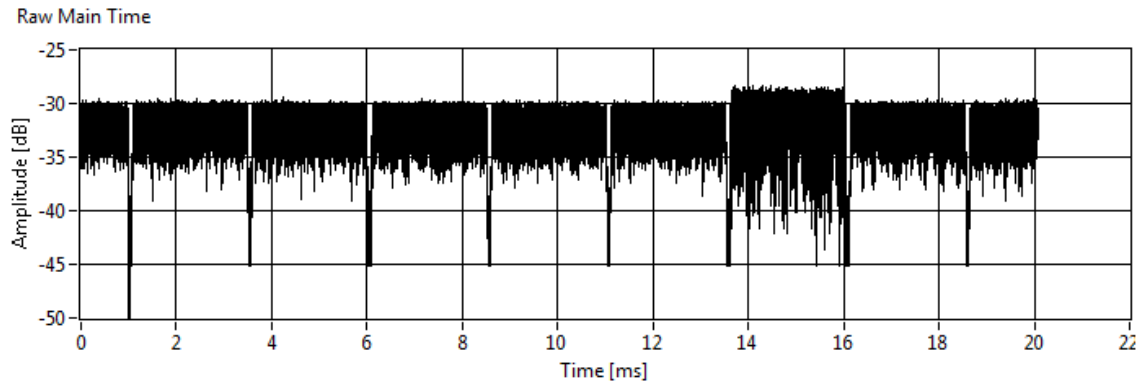


Figura 7-2: Señal en tiempo real obtenida en la frecuencia central 945,9 MHz

Sin embargo con solo esta prueba no se puede decir que el analizador implementado sirva para recibir señales GSM de cualquier estación base, pues no se pudo comprobar si los bits recibidos eran correctos o no.

En cuanto a los conocimientos adquiridos a lo largo de este proyecto, estos se basan fundamentalmente en la programación gráfica que se necesita para la utilización de LabVIEW. No obstante, tener experiencia con la programación con código ha servido de gran ayuda para su entendimiento. Esto no significa que sea más fácil una programación que otra. Lo cierto es que la de LabVIEW es más intuitiva y, al incorporar una gran cantidad de bloques prediseñados, acelera la creación del programa.

Además de esto, se ha tenido la oportunidad de trabajar a fondo con instrumentos que no se manejan en numerosas ocasiones a lo largo de la carrera. Se han podido analizar las posibilidades que ofrece un generador vectorial de señales y estudiar e investigar un analizador vectorial de señales, que, como se explica en la introducción, no es de extrañar que se cuente con pocos ejemplares en las universidades debido a su elevado coste.

Aparte, se ha trabajado con equipo Software Defined Radio, que es algo prácticamente desconocido para los estudiantes de este Grado de Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación. Se ha investigado sobre esta tecnología y se ha descubierto su potencial y capacidad de desarrollo.

7.2 Mejoras futuras

La principal mejora y más interesante sería capacitar al receptor para recibir señales de la estación base más próxima. Permitiendo, por ejemplo, que el receptor haga un barrido de frecuencias dentro de un rango, y que cuando la recepción sea óptima muestre las características ya implementadas de la señal.

Por otro lado, también se puede ampliar la recepción de señales a señales UMTS o LTE. Para ello sería necesario cambiar el demodulador, porque como ya se ha explicado, ambos utilizan modulaciones diferentes a la de GSM.

Resultaría interesante habilitar la búsqueda de patrones de bits en los bits recibidos. También se puede mejorar la interfaz gráfica de cara al usuario. Todos los botones y cajas son personalizables y se les puede cambiar su apariencia para hacerlos más atractivos. También se pueden cambiar los colores y cuadrículas de las gráficas, e incluso ordenarlas en pestañas o fijarlas al panel frontal.

Referencias

- [1] Wikipedia, «Analizador de espectro,» [En línea]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Spectrum_analyzer.
- [2] Keysight Technologies, «Vector Signal Analyzer,» [En línea]. Available: <http://www.keysight.com/en/pc-2416877/vector-signal-analyzer?pm=SC&nid=-32828.0&cc=ES&lc=spa>.
- [3] Rohde & Schwarz, «R&S®FSV Signal and Spectrum Analyzer,» [En línea]. Available: <http://www.rohde-schwarz.es/product/FSV.html>.
- [4] Wikipedia, «National Instruments,» [En línea]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/National_Instruments.
- [5] Wikipedia, «LabVIEW,» [En línea]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/LabVIEW>.
- [6] National Instruments, «Información general sobre la compañía,» [En línea]. Available: <http://www.ni.com/company/esa/>.
- [7] Wikipedia, «GSM,» [En línea]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/GSM>.
- [8] Wikipedia, «1G,» [En línea]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/1G>.
- [9] Wikipedia, «2G,» [En línea]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/2G>.
- [10] Know your Mobile, «GSM,» [En línea]. Available: <http://www.knowyourmobile.com/glossary/gsm>.
- [11] «Small-scale fading. Cellular concepts,» Transparencias de la asignatura *Mobile Radio Networks I* de la Universidad RWTH de Aachen, curso 2012-13.
- [12] PRIVATELINE. TELECOMMUNICATIONS EXPERTISE, «GSM History,» [En línea]. Available: http://www.privateline.com/mt_gsmhistory/04_architecture_of_the_gsm_network

- [13] Tutorialspoint, «GSM-Architecture,» [En línea]. Available:
http://www.tutorialspoint.com/gsm/gsm_architecture.htm.
- [14] Universidad de Sevilla, «DISEÑO, INTEGRACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE ESTACIONES BASE DE SEGUNDA GENERACIÓN,» [En línea]. Available:
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11980/fichero/CAP%CDTULO+3+-+FUNDAMENTOS+GSM+Y+UMTS%252F3.3+GSM.pdf>.
- [15] Keysight Technologies, «Alpha/BT (digital Demod),» [En línea]. Available:
http://wireless.agilent.com/wireless/helpfiles/89600B/WebHelp/subsystems/digdemod/content/dlg_digdemod_filtr_alphabt.htm.
- [16] ETSI, «Digital Cellular telecommunications system; Modulation (GSM 05.04 version 5.0.0),» [En línea]. Available:
http://www.etsi.org/deliver/etsi_i_ets/300900_300999/300959/01_40_60/ets_300959e01o.pdf.
- [17] Wikipedia, «Duplex (telecommunications),» [En línea]. Available:
[http://en.wikipedia.org/wiki/Duplex_\(telecommunications\)#Frequency-division_duplexing](http://en.wikipedia.org/wiki/Duplex_(telecommunications)#Frequency-division_duplexing).
- [18] ExtremeTech, «What is LTE-Advanced?,» [En línea]. Available:
<http://www.extremetech.com/mobile/135045-what-is-lte-advanced/5>.
- [19] «UMTS Architecture,» Transparencias de la asignatura *Mobile Radio Networks 2* de la Universidad RWTH de Aachen, curso 2012-13.
- [20] «Long Term Evolution (LTE),» Transparencias de la asignatura de *Mobile Radio Networks 2* de la Universidad RWTH de Aachen, curso 2012-13.
- [21] SDR Forum, «SDRF Cognitive Radio Definitions,» [En línea]. Available:
http://www.sdrforum.org/pages/documentLibrary/documents/SDRF-06-R-0011-V1_0_0.pdf.
- [22] Wikipedia, «Radiofrecuencia,» [En línea]. Available:
<http://es.wikipedia.org/wiki/Radiofrecuencia>.

- [23] Wireless Innovation Forum, «Software Defined Radio,» [En línea]. Available: <http://www.wirelessinnovation.org/assets/documents/SoftwareDefinedRadio.pdf>.
- [24] S. Katz y J. Flynn, «Software Defined Radio,» [En línea]. Available: http://www.csun.edu/~skatz/katzpage/sdr_project/sdr/sdr_project_overview_06_2010.pdf.
- [25] Wikipedia, «Radio Definida por Software,» [En línea]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Radio_definida_por_software.
- [26] National Instruments, «¿Qué es NI USRP?,» [En línea]. Available: <http://www.ni.com/usrp/what-is/esa/>
- [27] Wikipedia, «Universal Software Radio Peripheral,» [En línea]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Universal_Software_Radio_Peripheral.
- [28] Ettus Research, «USRP Hardware Driver(TM) software (UHD(TM)),» [En línea]. Available: <http://code.ettus.com/redmine/ettus/projects/uhd/wiki>.
- [29] National Instruments, «NI USRP-2920,» [En línea]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/209948>.
- [30] The Worlds of David Darling, «Instantaneous Bandwidth,» [En línea]. Available: <http://www.daviddarling.info/encyclopedia/I/instband.html>.
- [31] National Instruments, «Device Specifications. NI USRP(TM)-2920,» [En línea]. Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/375839a.pdf>.
- [32] Ettus Research, «VERT2450 Antenna,» [En línea]. Available: <https://www.ettus.com/product/details/VERT2450>.
- [33] Test Equipment Connection, «Agilent-Keysight E4438C,» [En línea]. Available: http://www.testequipmentconnection.com/43415/Agilent_E4438C-1E5-503.php.
- [34] Agilent Technologies, «Agilent E4438C ESG Vector Signal Generator. Data Sheet,» [En línea]. Available: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5988->

4039EN.pdf.

- [35] Test Equipment Connection, «Agilent-Keysight 89600S General Equipment,» [En línea]. Available:
http://www.testequipmentconnection.com/33290/Agilent_89600S.php.
- [36] Wikipedia, «Marca CE,» [En línea]. Available:
http://es.wikipedia.org/wiki/Marca_CE.
- [37] Asociación Española de Normalización y Certificación, «Marcado CE,» [En línea]. Available:
http://www.aenor.es/aenor/certificacion/seguridad/seg_marcadoce.asp#.VAcDi3V_SM.
- [38] Asociación Española de Normalización y Certificación, «UNE-EN 61010-1:2002,» [En línea]. Available:
https://www.aenor.es/AENOR/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0027277&PDF=#.VAZPg43V_SM.
- [39] International Electrotechnical Commission, «International Standard. IEC 61010-1,» [En línea]. Available: http://webstore.iec.ch/p-preview/info_iec61010-1%7Bed2.0%7Den_d.pdf.
- [40] European Commission, «Electromagnetic Compatibility (EMC),» [En línea]. Available: http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/electrical/emc/index_en.htm.
- [41] Asociación Española de Normalización y Certificación, «UNE-EN 61326-1:2006,» [En línea]. Available:
http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?codigo=N0037563&tipo=N#.VAZO9Y3V_SM.
- [42] Asociación Española de Normalización y Certificación, «UNE-EN 55011:2011,» [En línea]. Available:
https://www.aenor.es/AENOR/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0046988&PDF=Si#.VAZO6I3V_SM.

- [43] RF EMC Development, «EN 55011:2009 Industrial, scientific and medical equipment - Radio-frequency disturbance characteristics. Limits and methods of measurement,» [En línea]. Available:
<http://rfemcdevelopment.eu/index.php/en/emc-emi-standards/en-55011-2009>.

- [44] Wikipedia, «Diagrama de Constelación,» [En línea]. Available:
http://en.wikipedia.org/wiki/Constellation_diagram.

Anexos

A. DIAGRAMAS DE BLOQUES DEL DEMODULADOR.....	94
B. MANUAL DE UTILIZACIÓN DEL ANALIZADOR IMPLEMENTADO	97
C. CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA DEL ANALIZADOR AGILENT	100

A. Diagramas de bloques del demodulador

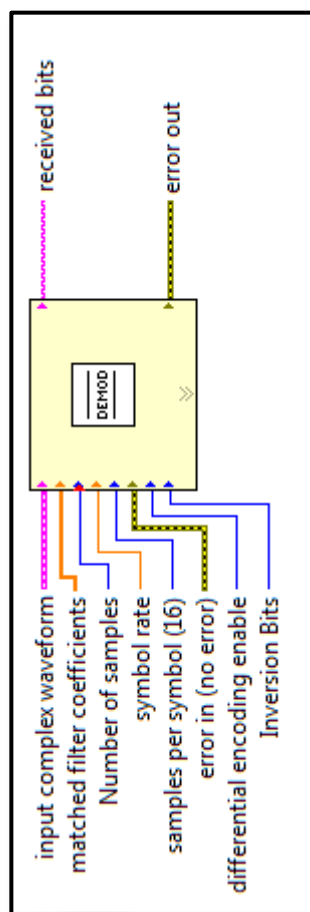


Figura A-1: Diagrama de bloques del demodulador desarrollado

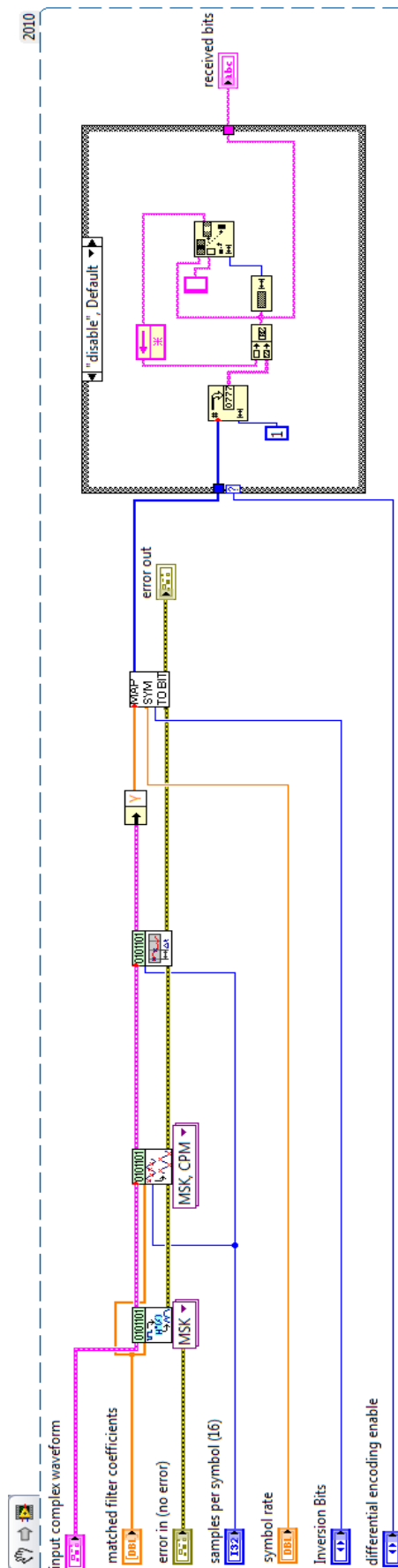


Figura A-2: Instrumento virtual del demodulador desarrollado

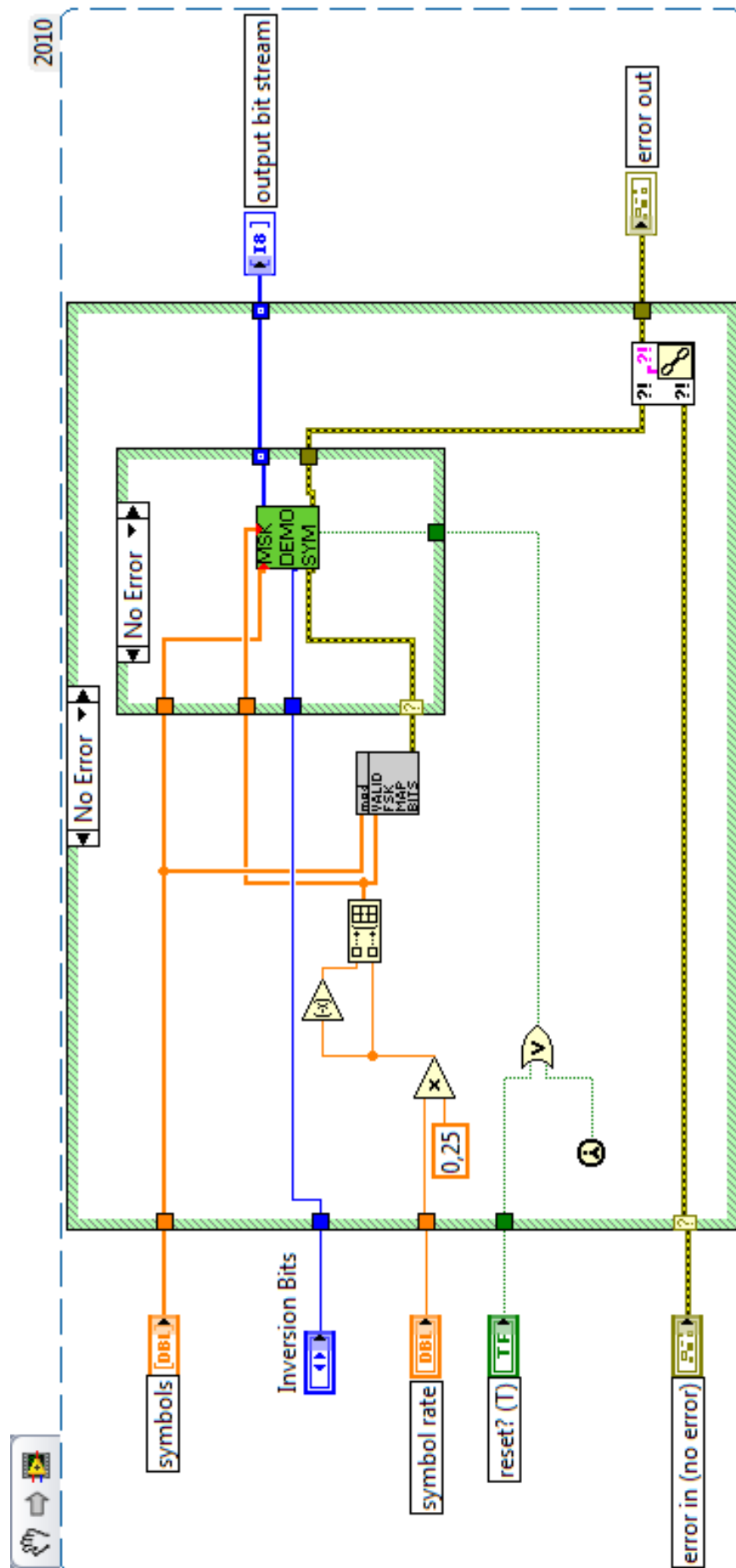


Figura A-3: Diagrama de bloques de MT Map Symbols to Bits con las modificaciones pertinentes

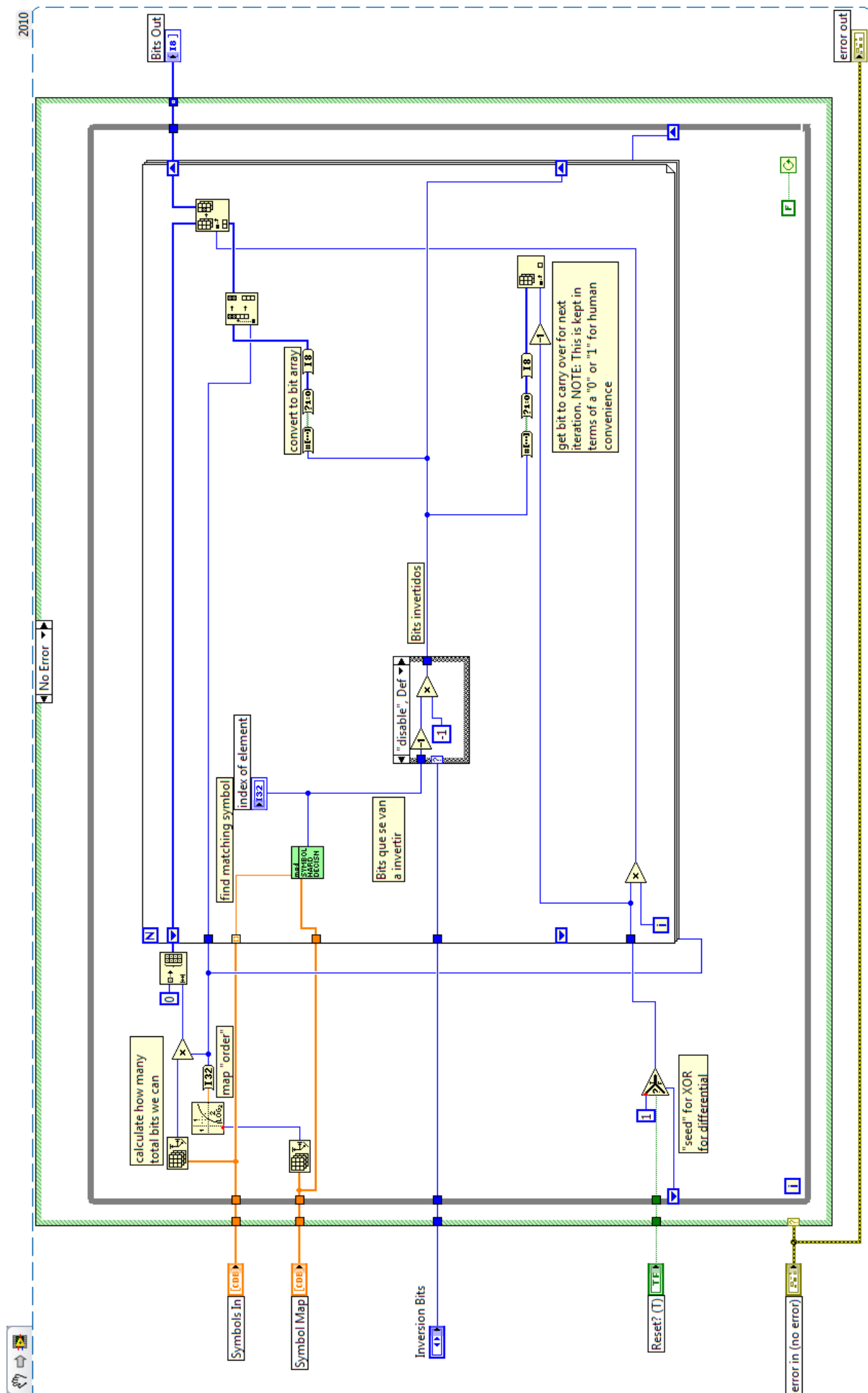


Figura A-4: Diagrama de bloques de demodulación de modulación MSK. Symbol1 Demod con los cambios pertinentes

B.Manual de utilización del analizador implementado

En la descripción de este manual se asume que se tienen correctamente conectados los equipos según se explica en el apartado 5.2 Equipo empleado.

Para poder utilizar la herramienta desarrollada, además de contar con el software y el equipo adecuado, es necesario tener los siguientes cinco archivos:

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
Decoder	27/08/2014 12:49	LabVIEW Instrume...	17 KB
DemodJimena	27/08/2014 12:18	LabVIEW Instrume...	32 KB
mod_MSK Demod Symbol Demap_Jimena	27/08/2014 12:18	LabVIEW Instrume...	27 KB
MT Map Symbols to Bits_Jimena	27/08/2014 12:18	LabVIEW Instrume...	25 KB
Receptor	15/09/2014 12:55	LabVIEW Instrume...	131 KB

Figura B-1: Archivos necesarios para la utilización de la herramienta desarrollada

El instrumento virtual principal es el que se llama “*Receptor.vi*”. Al hacer doble click sobre él se abre una ventana con la siguiente apariencia:

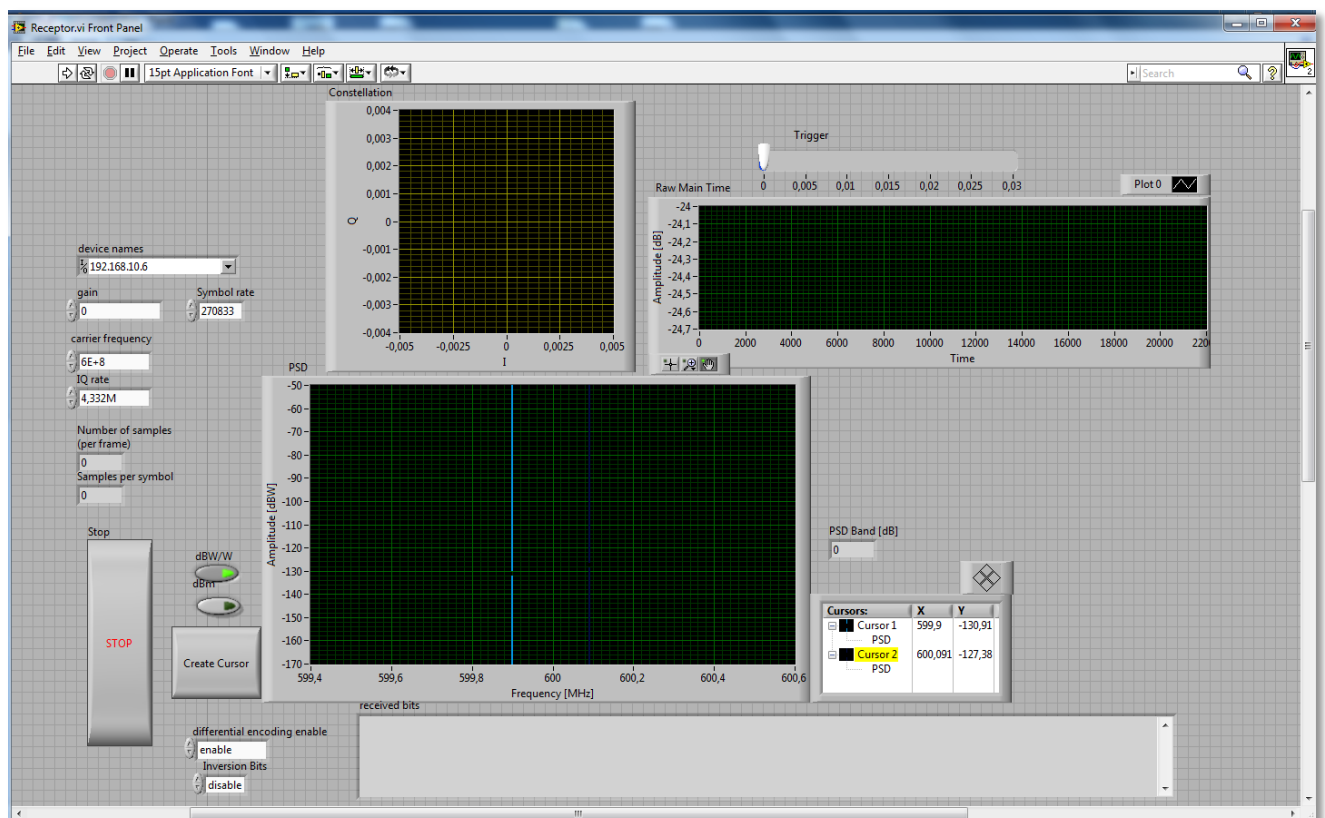


Figura B-2: Apariencia de la aplicación al abrirla

A continuación es imprescindible especificar la IP del USRP, como se indica en la sección USRP del apartado 5.2 Equipo empleado.

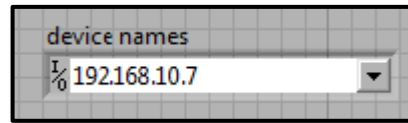


Figura B-3: Entrada para especificar la IP del USRP

También es posible especificar la frecuencia de portadora (carrier frequency) y la tasa de muestreo (IQ Rate). Sin embargo, como se ha explicado en la sección Demodulación del apartado 5.4 Pruebas y validación, la tasa de muestreo mínima necesaria es la que aparece en la Figura B-4.

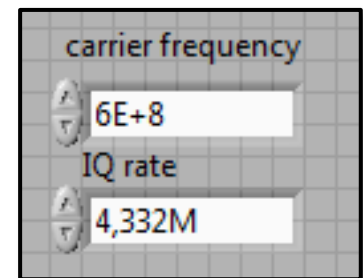


Figura B-4: Frecuencia portadora y tasa de muestreo

Una vez introducidos estos datos, ya se puede ejecutar el programa. Para ello simplemente hay que hacer click sobre el botón “Run”:

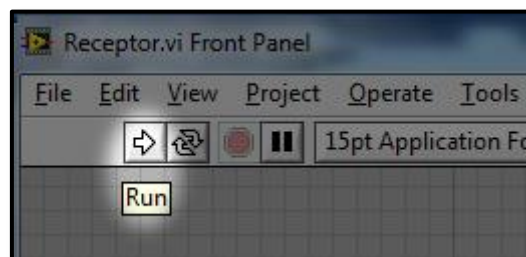


Figura B-5: Botón para ejecutar la aplicación

Cuando se quiera parar la recepción de la señal, se puede pulsar el botón de “Stop” que se ha habilitado:

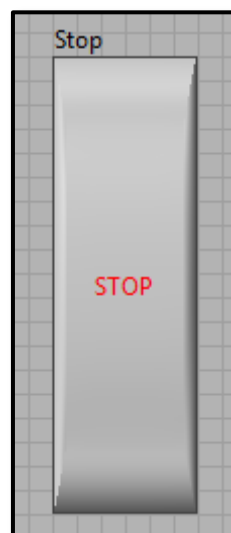


Figura B-6: Botón para detener la aplicación

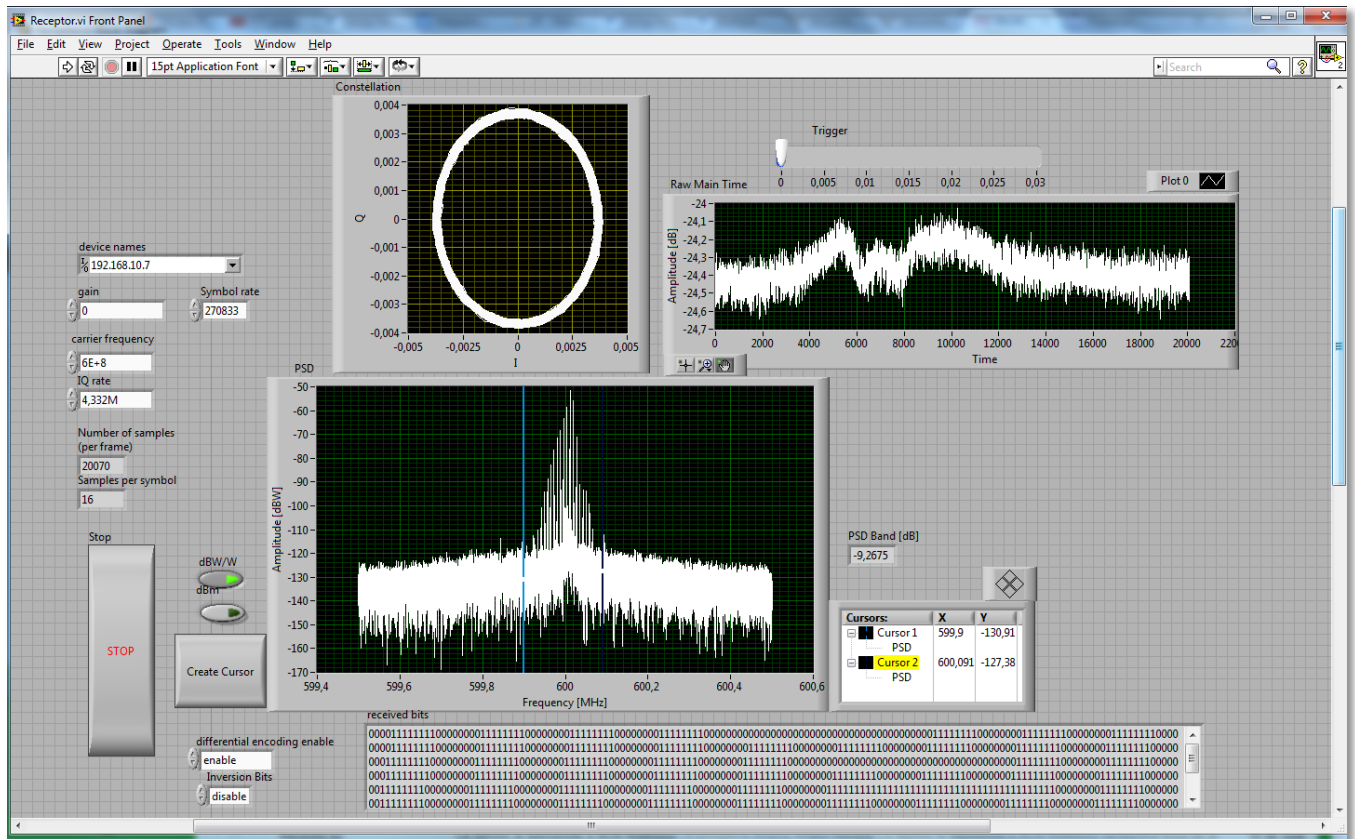


Figura B-7: Panel frontal de Receptor .vi

Como se puede observar, en la ventana de la parte inferior de la Figura B-7 se muestran los bits recibidos. En este caso en concreto se trata de un patrón de 8 1's y 8 0's. No obstante, la recepción no está libre de errores, así que a veces se reciben ristas de bits, como se puede ver en la primera y la tercera líneas de bits.

A su izquierda se encuentran dos desplegables que sirven para activar o desactivar la codificación diferencial (differential encoding enable) o la inversión de bits.

C. Configuración del programa del Analizador Agilent

Una vez se haya configurado el Analizador Vectorial de Señales, se instala automáticamente un software con el que se puede interactuar y en el que se muestran las características de las señales recibidas por él. Se puede acceder a dicho software buscando su icono:

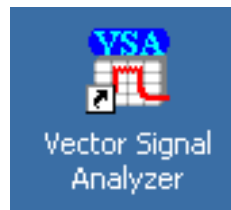


Figura C-1: Icono del software del Analizador Vectorial de señales

Una vez abramos el software, nos aparecerán dos gráficas, una en la parte de arriba que representa la constelación de la señal que se está recibiendo, y la otra en la parte de abajo, que por defecto es la densidad espectral de potencia.

Procedemos a configurar el demodulador. Para ello hay que pulsar sobre “MeasSetup” en la barra de herramientas, donde saldrá un desplegable. Se pulsa sobre “Demodulator” y se selecciona “Digital Demod”.

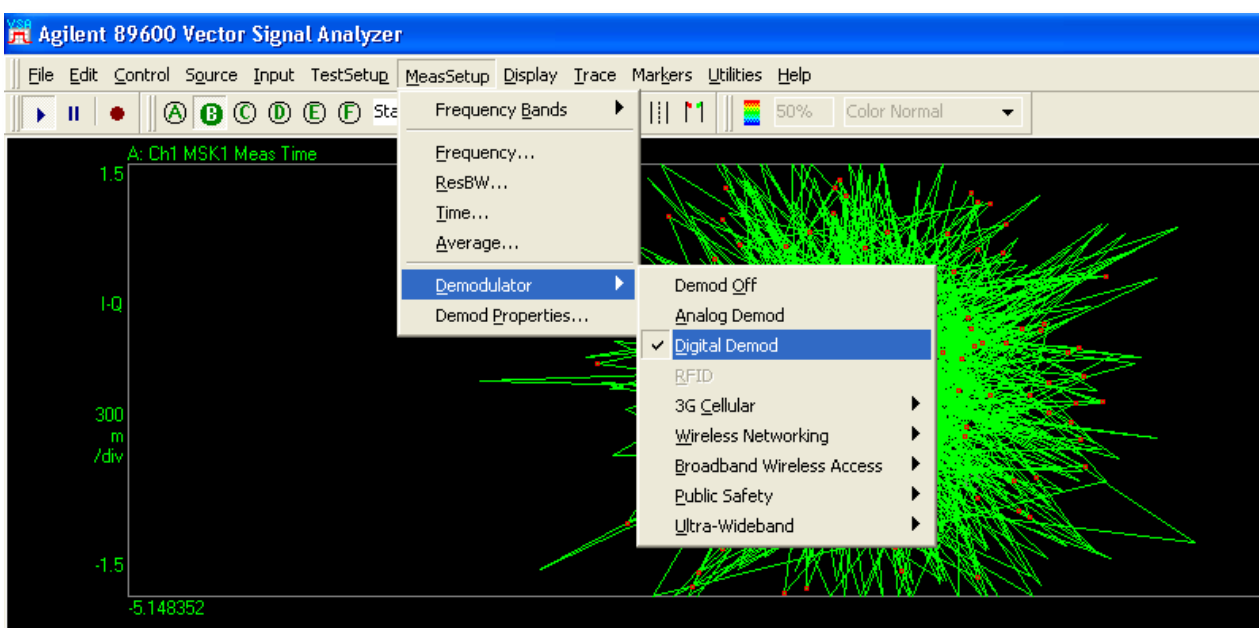


Figura C-2: Configuración del demodulador digital

A continuación se debe seleccionar el demodulador de GSM. Esto se hace pulsando, en el mismo desplegable que ofrece “MeasSetup”, sobre “Demod Properties...”.

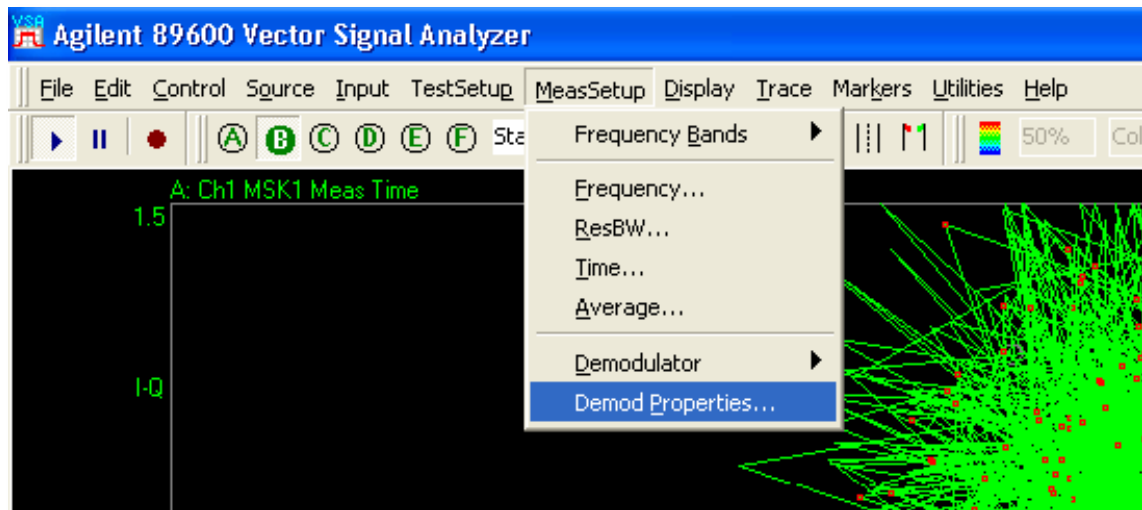


Figura C-4: Configuración del demodulador GSM. Paso 1

Aparecerá una ventana en la que hay que hacer click sobre “Preset to Standard...”. Luego se selecciona “Cellular” y finalmente se pulsa sobre “GSM”.

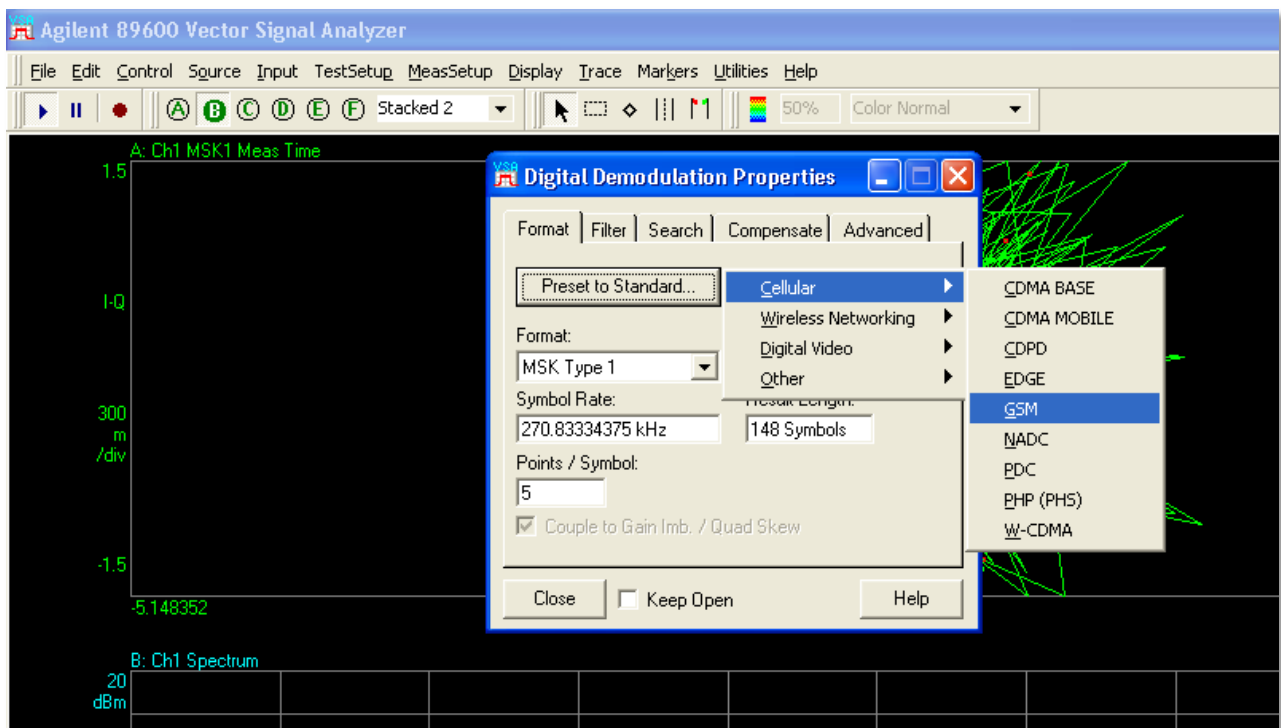


Figura C-3: Configuración del demodulador GSM. Paso 2

Para ver la constelación y la densidad espectral de potencia hay que poner una frecuencia central correcta. En este caso se ha trabajado siempre con 600 MHz. Por defecto la frecuencia central es 1 GHz, y para editarla hay que hacer click secundario sobre este valor y seleccionar “Edit...”

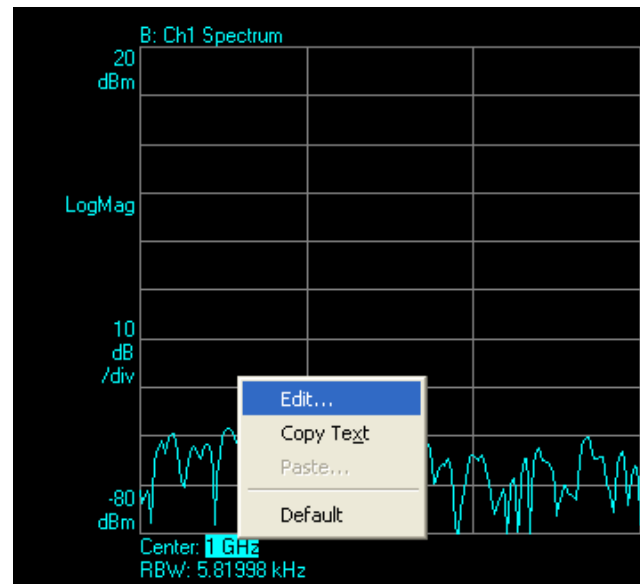


Figura C-5: Configuración de la frecuencia central

Aparecerá una ventana en la que se puede escribir la frecuencia deseada. Una vez se haya escrito la frecuencia correcta, el resultado de las gráficas será algo así:

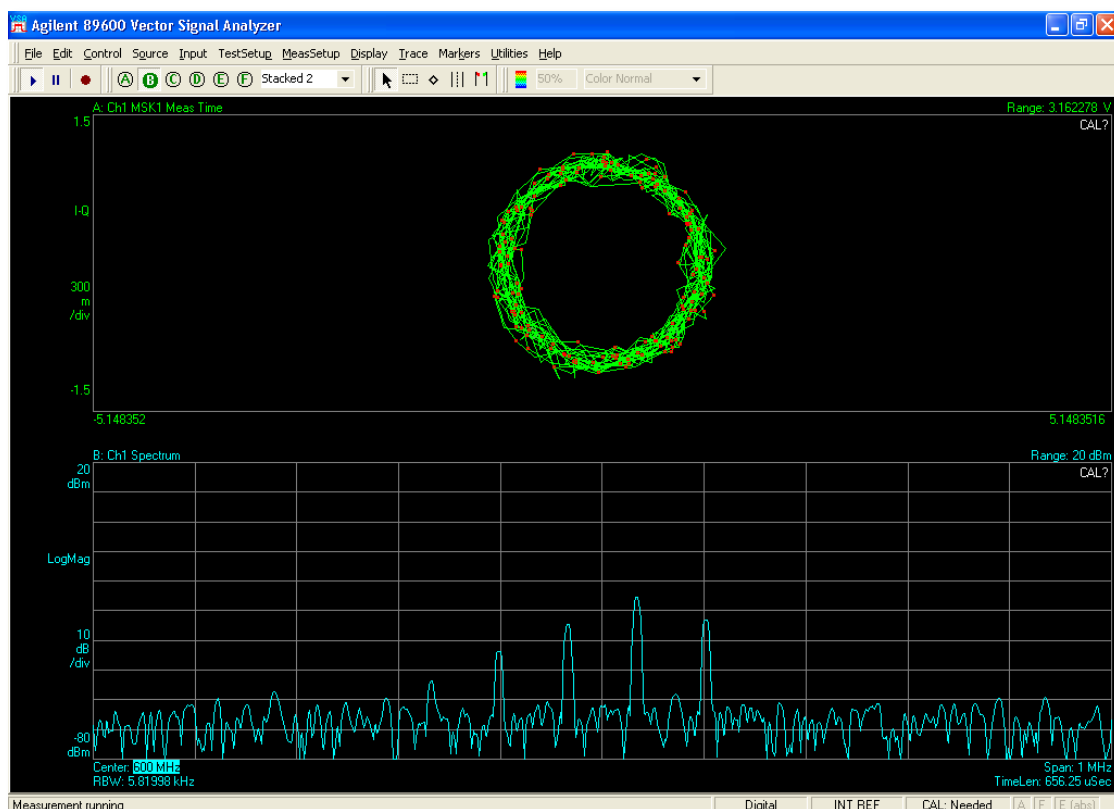


Figura C-6: Resultado tras configurar la frecuencia central

Ahora se puede cambiar el número de gráficas que se quieren ver. En este caso se ha trabajado siempre con 4. Para ello hay que abrir el desplegable que hay justo debajo de la barra de herramientas, donde pone “Stacked 2”, que significa que lo que se está mostrando ahora son dos gráficas apiladas. Se selecciona “Grid 2x2”:

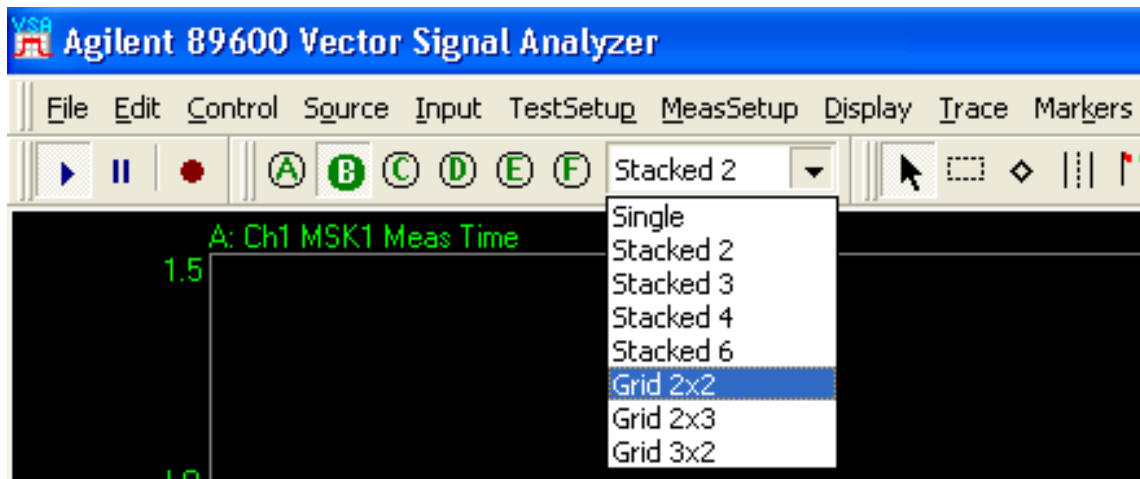


Figura C-7: Cuadrícula 2x2

El resultado es el siguiente:

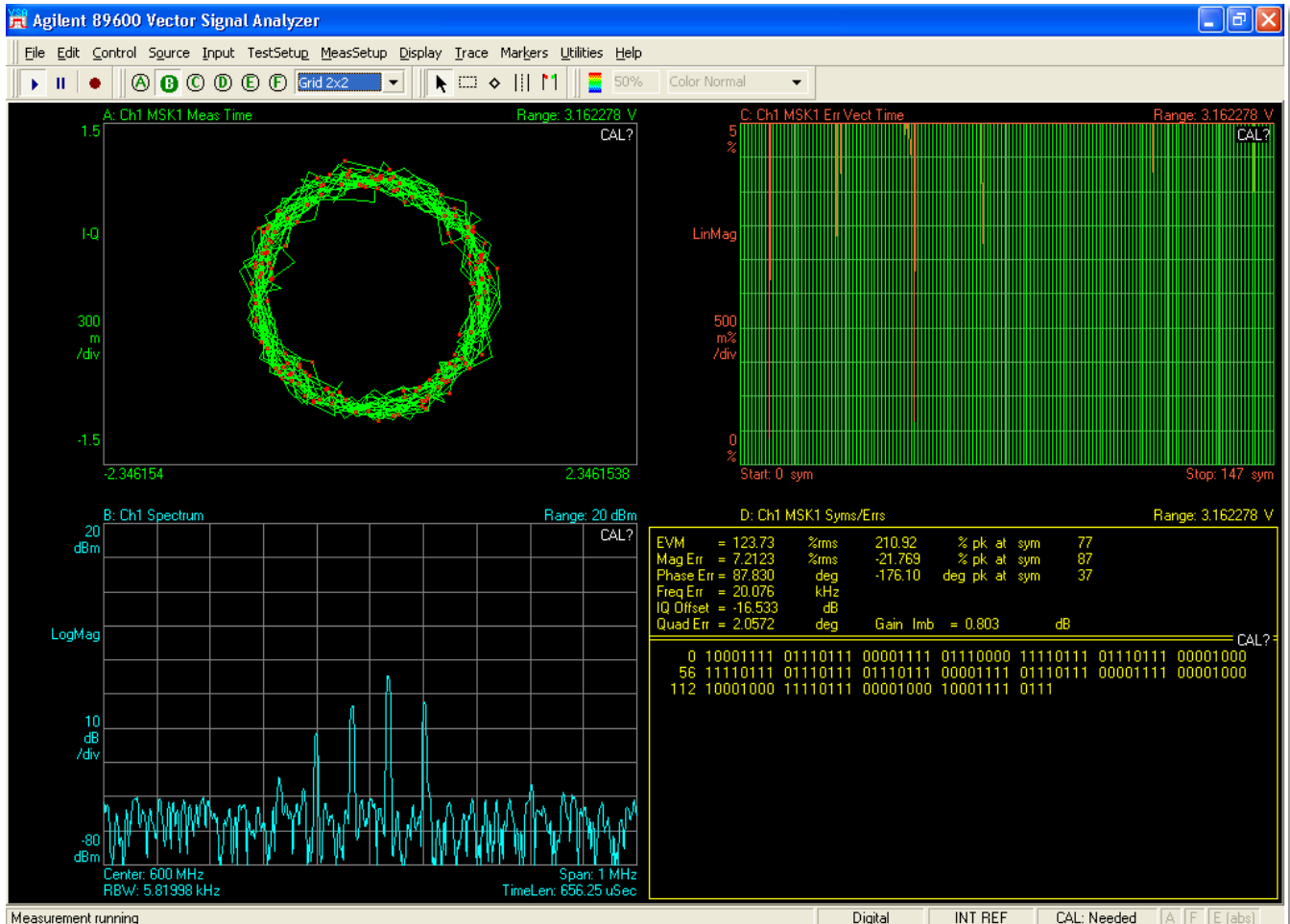


Figura C-8: Cómo cambiar el número de gráficas

La gráfica de la parte superior derecha no resulta interesante, así que para cambiarla hay que hacer click secundario sobre su título y seleccionar “Edit...”.

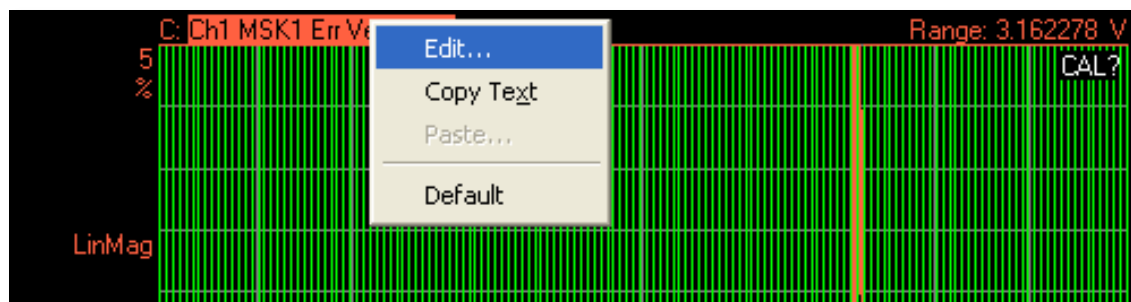


Figura C-9: Cómo cambiar una gráfica

Saldrá una ventana llamada “Trace Data” con una lista de varias opciones de datos a visualizar, entre las que se elegirá “Raw Main Time” para poder ver la señal en tiempo real.

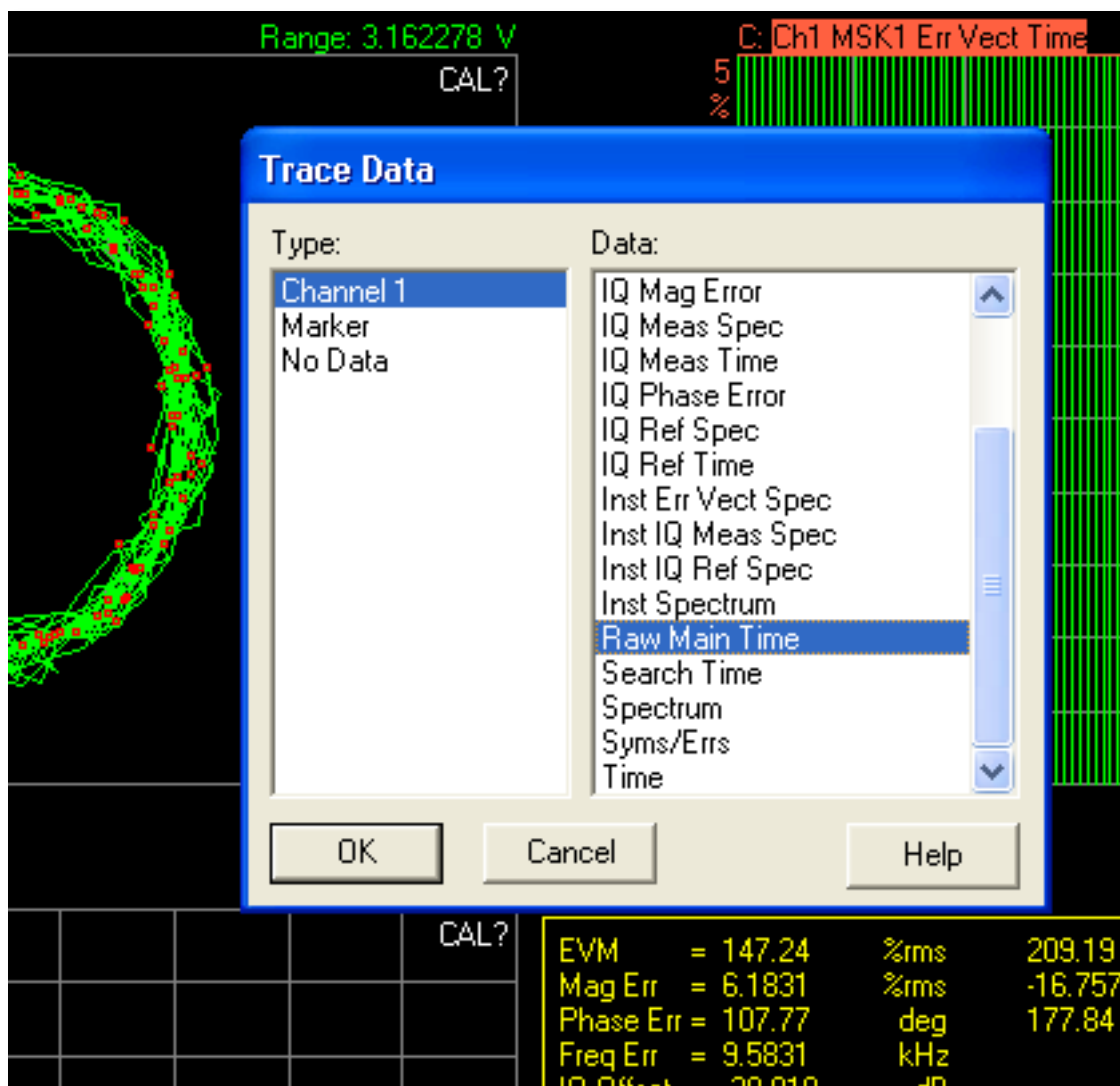


Figura C-10: Elección de gráfica “Raw Main Time”

La gráfica superior derecha ahora será como se muestra en la Figura C-11:

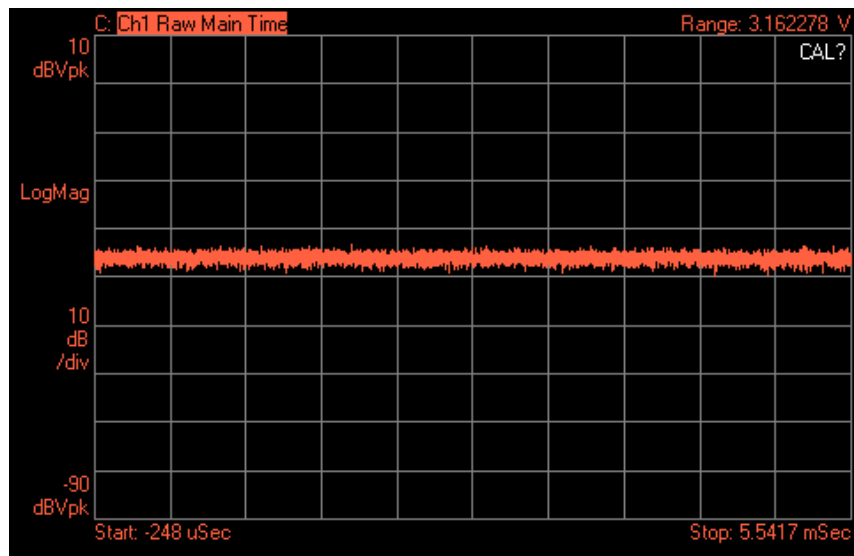


Figura C-11: Señal en tiempo real

Sin embargo, la escala de esta última gráfica no está bien. Para conseguirlo, hay que hacer click secundario sobre ella y seleccionar “Y Auto Scale”:

El resultado es el siguiente:

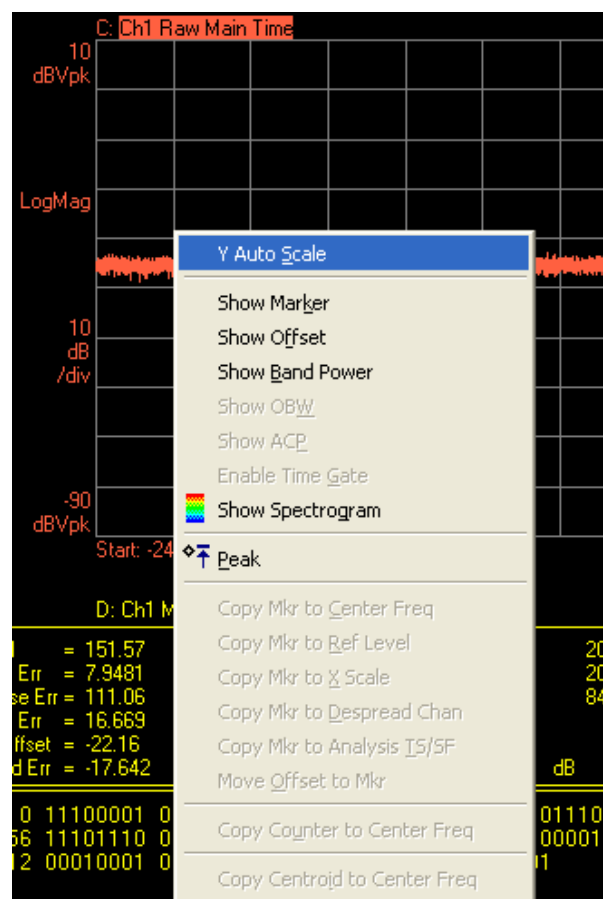


Figura C-12: Autoescalar gráfica

En la **Error! Reference source not found.** se ve cómo quedaría la pantalla tras

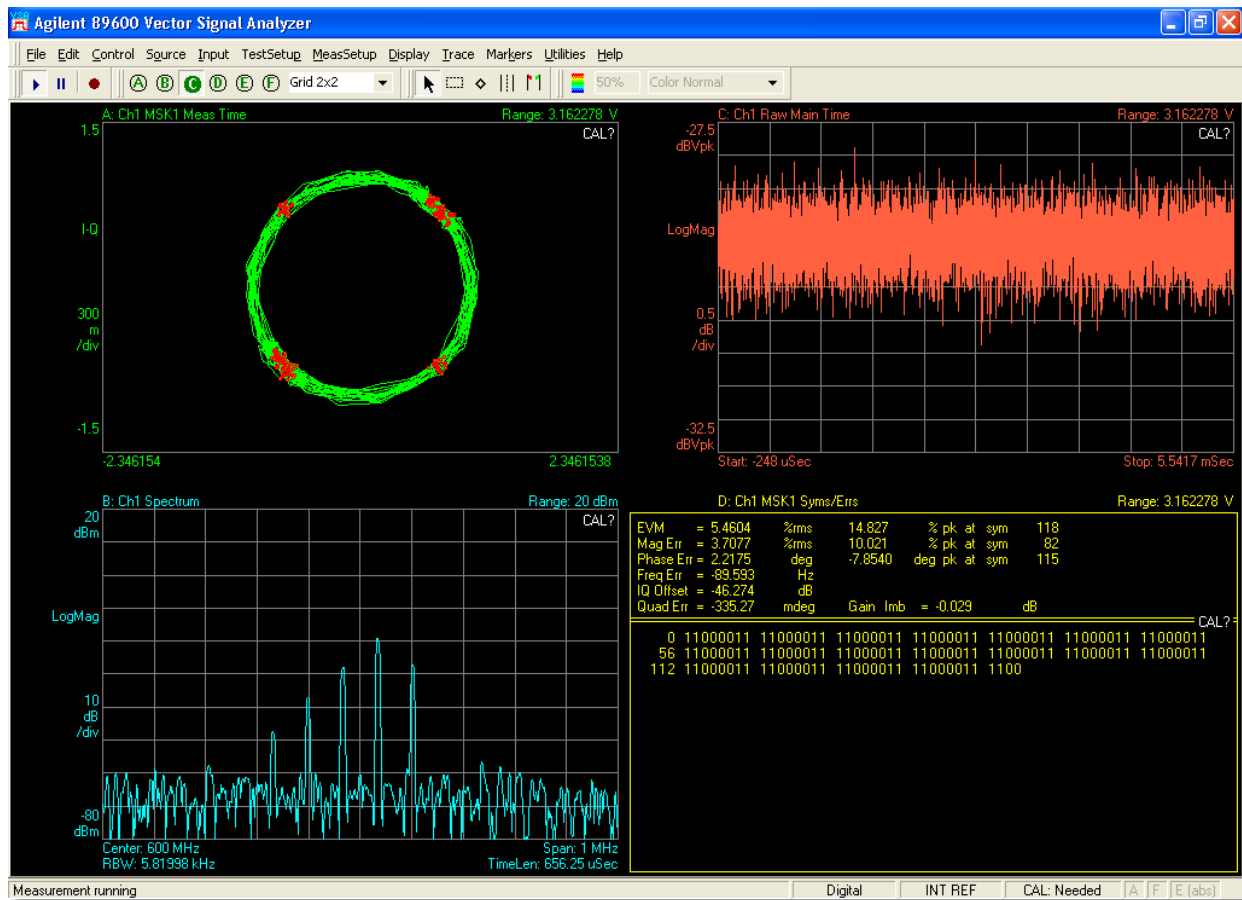


Figura C-13: Resultado de los cambios realizados

Para ver más claramente la señal en tiempo real, se configura el generador con la

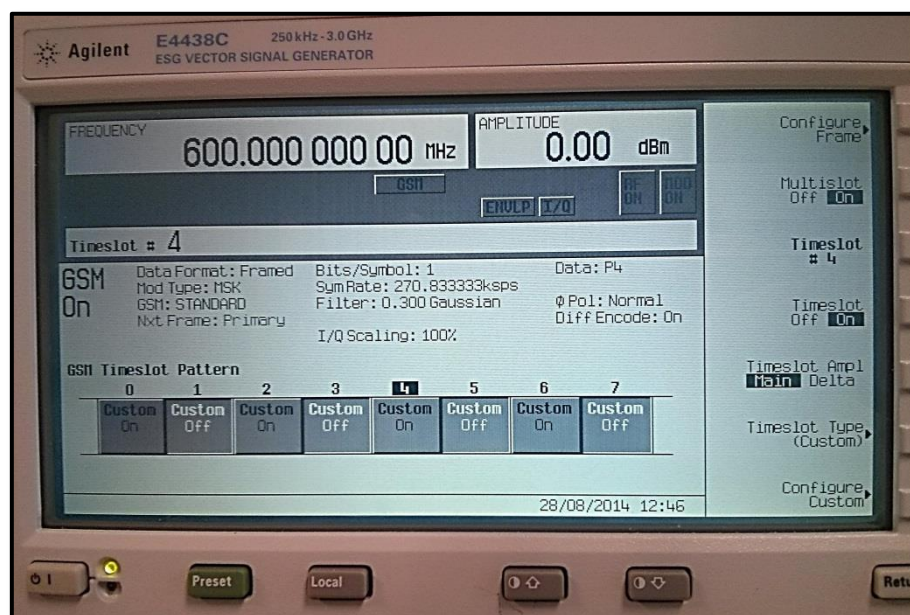
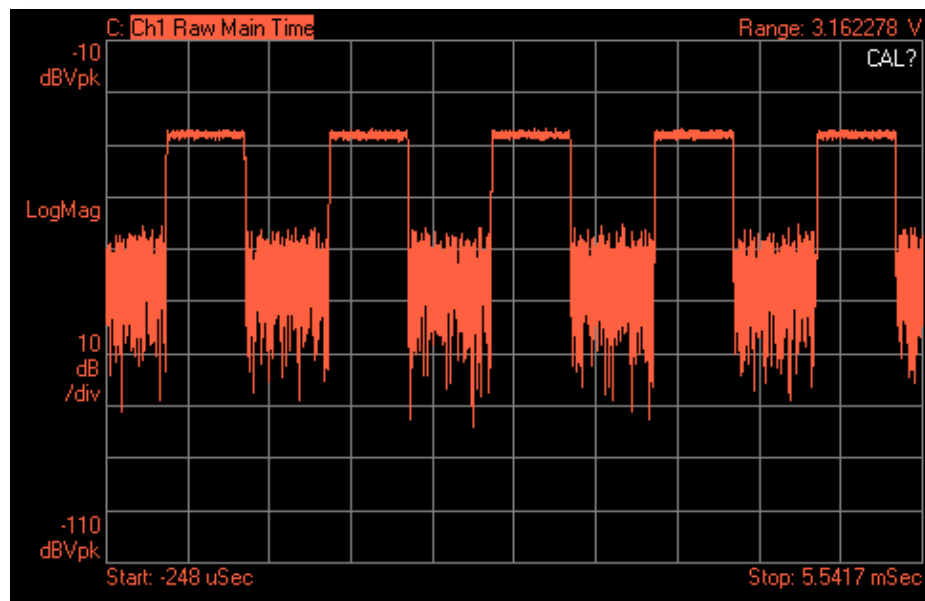


Figura C-14: Configuración del generador de señales

siguiente configuración, alternando ranuras de tiempo activas:



Y lo que se recibe es:

A todas las gráficas se les puede añadir un marcador que dará el valor de la función en ese punto preciso.

Para agregar un marcador hay que hacer click secundario sobre la gráfica en la

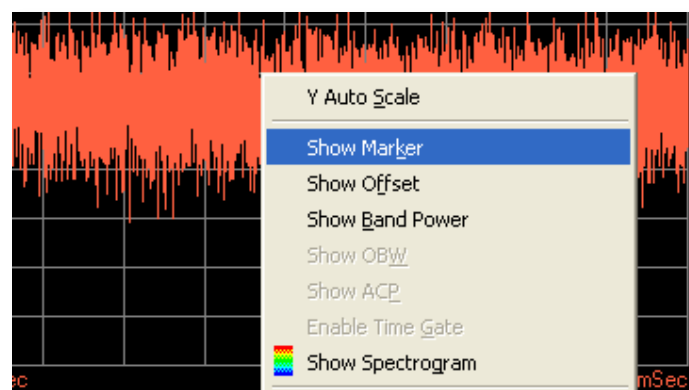


Figura C-15: Señal en tiempo real recibida para la configuración de la Figura C-14

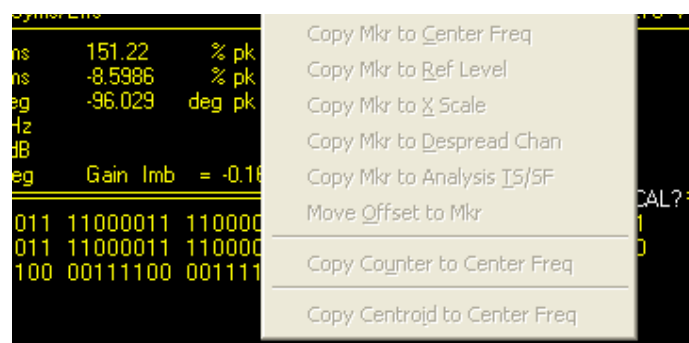


Figura C-16: Cómo añadir un marcador a una gráfica

que se quiera poner y seleccionar “Show Marker”

Una vez seleccionada esa opción, aparecerá sobre la gráfica el marcador, y en la parte inferior de la pantalla sus las características:

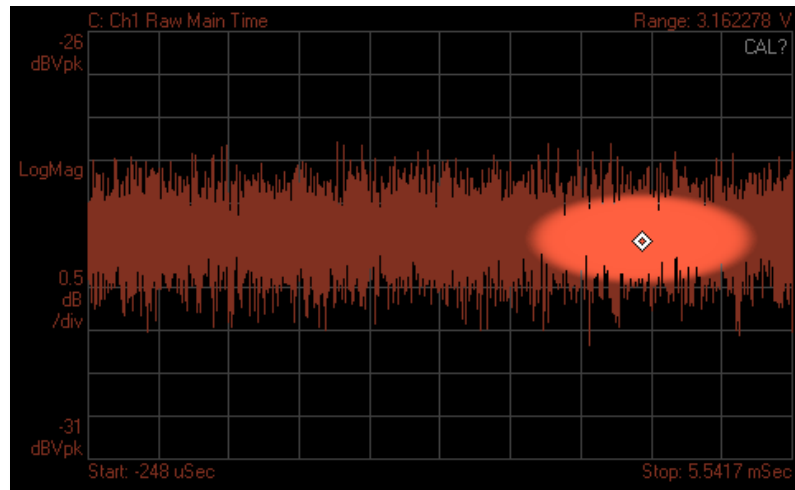


Figura C-17: Marcador sobre una gráfica

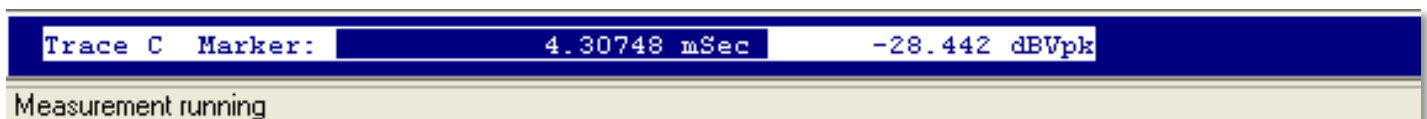


Figura C-18: Características del marcador añadido

Donde “Trace C” hacer referencia a la gráfica a la que pertenece el marcador. En este caso pertenece a la gráfica C: Ch1 Raw Main Time.

Para ver la potencia que hay en un rango de frecuencia, se hace click derecho sobre la gráfica de la potencia espectral de potencia, y se selecciona la opción “Show Band Power”:

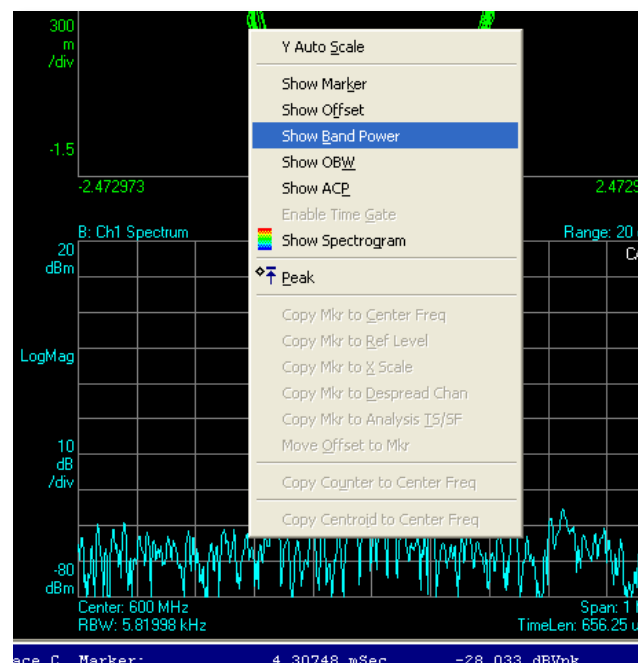


Figura C-19: cómo añadir una banda de potencia

Entonces aparece sobre el cursor un icono de tres rayas paralelas verticales que representan los extremos del rango de frecuencias y la frecuencia central. Una vez se haya ubicado donde se desee, el resultado es el siguiente:

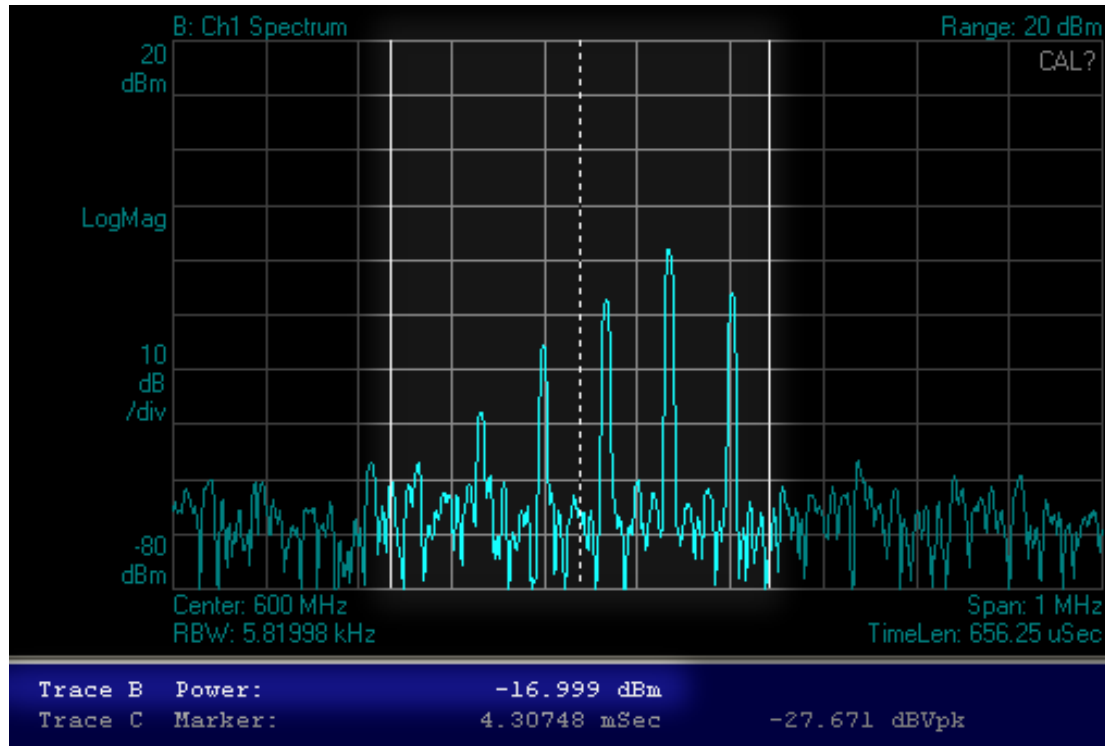


Figura C-20: Potencia comprendida entre dos frecuencias

Como se puede observar, se ha añadido un nuevo marcador a la parte inferior de la pantalla, esta vez asociado a la gráfica B: Ch1 Spectrum. El número que aparece a su derecha es la potencia comprendida entre el rango de frecuencias especificado.